

Étude par les éléments finis du module d'Young selon les  
caractéristiques des fibres élémentaires de chanvre et de coco

par

Thomas LEPLANOIS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M. SC. A.

MONTREAL, LE 22 SEPTEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Leplanois Thomas, 2017

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Anh Dung Ngô, directeur du mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmene, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Éric David, membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 19 SEPTEMBRE 2017**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## **REMERCIEMENTS**

En préambule de ce mémoire de fin d'études, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ces deux années d'études ou qui m'ont aidé dans mes démarches.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur Anh Dung NGÔ, mon directeur de recherche, pour son soutien, son implication et son aide tout au long de cette maîtrise. Grâce à lui j'ai eu l'opportunité de travailler sur un sujet particulièrement intéressant. Ses conseils, sa rigueur et son suivi régulier m'ont permis de rester toujours fidèle à mes objectifs.

J'adresse ensuite mes remerciements à M. Claude Daniel LEGAULT, M. Nabil MAZEGHRANE, Dr. Hossein MONAJATI, M. Normand GRAVEL, Dr. Jules KOUAM et M. Olivier BOUTHOT qui m'ont aidé lors de la réalisation des expériences lorsque je les ai sollicités.

Je tiens également à remercier mes amis pour leur implication et leur soutien pendant ces deux années. Échanger avec eux quasi quotidiennement aura sans doute contribué au maintien de ma bonne humeur et de ma motivation pour ce mémoire.

Enfin, je remercie vivement ma famille de m'avoir soutenu tout le long de ce projet. Je les remercie vivement de m'avoir permis de continuer mes études au Canada afin d'effectuer cette maîtrise.



# **ÉTUDE PAR LES ÉLÉMENTS FINIS DU MODULE D'YOUNG SELON LES CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES ÉLÉMENTAIRES DE CHANVRE ET DE COCO**

Thomas LEPLANOIS

## **RÉSUMÉ**

Cette recherche a pour objectif d'étudier la morphologie des fibres de chanvre et coco, et plus particulièrement, d'étudier la morphologie de leurs fibres élémentaires. Après avoir caractérisé la section et les dimensions des fibres élémentaires, une modélisation de chacune des fibres élémentaires a été réalisée.

Grâce aux observations faites au microscope électronique à balayage (MEB), il a été conclu une similitude entre les fibres de chanvre et celles de coco. En effet, ces deux fibres sont composées de plusieurs fibres élémentaires. Pour la fibre de coco, cette observation a déjà été faite, mais pour le chanvre, cette découverte est unique. La fibre de chanvre étant une fibre libérienne, elle ne devrait pas être composée de fibres élémentaires, mais à cause de ses faibles dimensions, plusieurs fibres sont restées "collées" entre elles formant un ensemble plus grand.

À la suite de cela, plusieurs modèles ont été créés afin de voir les variations du module d'Young quand les dimensions des fibres élémentaires changent, ainsi que leur composition chimique. Il a été possible de dire qu'elles sont les paramètres qui influent le plus sur le module d'Young : tel que l'arrangement des fibrilles dans la paroi de la fibre, ainsi que l'inclinaison des microfibrilles. Alors que la forme de la section de la fibre élémentaire et les dimensions du lumen ou l'épaisseur de la paroi interagissent moins sur le module d'Young.

**Mots-clés** : Chanvre, Coco, Module d'Young, MEB, fibres élémentaire, Modélisation





# **STUDY OF THE YOUNG'S MODULUS OF HEMP AND COCO FIBERS BY THE MEANS OF THE FINITE ELEMENTS METHODE AND DEPENDING ON THEIR ELEMENTARY FIBERS**

Thomas LEPLANOIS

## **ABSTRACT**

The aim of this present thesis is to study the hemp and the coco fibers, and more precisely their elementary fibers. After each one of the elementary fibers has been characterized by its section and dimensions, they have been numerically modeled.

The SEM observations carried out on both fibers lead to the conclusion that there is a structural similarity between hemp and coco. Indeed, both fibers consist of several elementary fibers. This particularity was already known for the coco but this is an entirely new discovery when it comes to the hemp. The hemp is a bast fiber plant (also called phloem or skin fiber) thus it shouldn't be composed of elementary fibers. Nevertheless, its small dimensions caused the fibers to "stick" together so that they form a larger structure.

This being so, the fiber's Young's modulus has been studied through different numerical modelisations: the purpose was to identify its variations depending on the fiber's dimensions and their chemical composition. The results obtained, helped to identify the parameters affecting the most the Young's modulus, as for instance the fibrils layout inside the fiber's wall or the inclination of those fibrils. On the other hand, it's been deduced that the shape of the elementary fiber's section, the lumen's dimension or the fiber's wall thickness have a limited impact on the Young's modulus variations.

**Key words:** coco fiber, elementary fiber, hemp fiber, numerical modelisation, SEM, Young's modulus.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1    REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	5
1.1    Les fibres naturelles .....	5
1.2    La morphologie des fibres végétales.....	6
1.3    La composition chimique des fibres naturelles.....	9
1.3.1    Fibrilles et microfibrilles.....	10
1.3.1.1    La cellulose .....	11
1.3.2    La partie amorphe de la paroi de la fibre .....	13
1.3.2.1    La lignine .....	13
1.3.2.2    L'hémicellulose.....	14
1.3.2.3    La pectine.....	15
1.3.3    Les caractéristiques mécaniques de chaque composant de la paroi de la fibre .....	16
1.4    Composite à base de fibres naturelles.....	17
1.5    Le comportement des fibres végétales en traction.....	18
1.6    La morphologie des deux fibres végétales.....	20
1.6.1    Le chanvre.....	20
1.6.1.1    De la plante à la tige.....	21
1.6.2    Le coco.....	24
1.7    Objectifs, hypothèses et retombées du projet .....	26
1.7.1    Objectifs du projet.....	26
1.7.2    Approche.....	27
1.7.3    Hypothèses de recherche.....	28
1.7.4    Délimitations de l'étude.....	28
1.7.5    Retombées attendues et importance de l'étude.....	29
CHAPITRE 2    EXPÉRIMENTATION POUR DÉTERMINATION DE LA MORPHOLOGIE DE LA FIBRE DE CHANVRE.....	31
2.1    Introduction.....	31
2.2    Coupe à l'aide du microtome.....	32
2.2.1    Caractéristique du microtome .....	32
2.2.2    Échantillon avec une résine de paraffine .....	33
2.2.3    Échantillon avec une résine de polyester.....	35
2.2.3.1    Méthode de préparation de la résine de polyester.....	35
2.2.3.2    Découpe des échantillons enrobés avec la résine de polyester ..	36
2.2.3.3    Découpe des échantillons faits avec la résine de polyester sous azote liquide.....	37
2.3    Coupe à l'aide d'un simple couteau à lame rétractable .....	38
2.3.1    Procédé pour l'observation de la fibre de chanvre.....	38
2.3.2    Résultats obtenus à l'aide du MEB.....	39

2.4	Coupe à l'aide d'une scie diamantée .....	40
2.4.1	Échantillon avec une résine d'Époxy.....	41
2.4.2	Observation de ces échantillons au MEB .....	42
2.5	Bilan des découpes faites à l'aide d'une lame .....	43
2.6	Expérimentations avec une méthodologie non destructive.....	43
2.6.1	Observation par les rayons X.....	43
2.6.2	Coupe à l'aide d'un laser .....	44
CHAPITRE 3 OBSERVATION ET INTERPRÉTATION DES COUPES DE CHACUNE DES FIBRES VÉGÉTALES .....		45
3.1	Introduction.....	45
3.2	Observation de la fibre de Coco.....	46
3.2.1	Introduction.....	46
3.2.2	Interprétation.....	49
3.3	Observation de la fibre de Chanvre .....	57
3.3.1	Introduction.....	57
3.3.2	La fibre de chanvre .....	57
3.3.3	Interprétation.....	59
CHAPITRE 4 ÉLABORATION D'UN MODÈLE ET DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE .....		63
4.1	Introduction.....	63
4.2	Modélisation d'une fibre naturelle.....	63
4.2.1	Modèle utilisé dans ce mémoire .....	63
4.3	Calculs théoriques des modules d'élasticité de chacune des couches par rapport aux axes naturels des microfibrilles.....	65
4.3.1	Calculs des modules d'élasticité des microfibrilles .....	66
4.3.2	Calculs des modules d'élasticité de la matrice .....	69
4.3.3	Calculs des modules d'élasticité d'un pli unidirectionnel .....	71
4.4	Valeurs des propriétés d'élasticité des fibres selon l'axe des microfibrilles .....	72
4.4.1	Les propriétés d'élasticité des fibres de coco selon l'axe des microfibrilles.....	74
4.4.2	Les propriétés d'élasticité des fibres de chanvre selon l'axe des microfibrilles.....	75
4.5	Modélisation des fibres de coco et de chanvre .....	76
4.5.1	Introduction.....	76
4.5.2	Logiciels utilisés .....	78
4.5.3	Géométrie.....	78
4.5.4	Système de coordonnées.....	80
4.5.5	Maillage .....	82
4.5.6	Les conditions initiales .....	84
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION .....		85
5.1	Introduction.....	85
5.2	Comparaison avec la littérature .....	86
5.3	Variation du diamètre du lumen .....	89

5.4	Variation de l'angle des microfibrilles .....	92
5.5	Variation du diamètre avec une épaisseur constante de la paroi .....	94
5.6	Variation de la composition chimique .....	96
5.7	Variation de l'épaisseur de la paroi sur une même fibre élémentaire.....	100
5.7.1	Étude des modèles ayant une épaisseur constante .....	103
5.7.2	Étude des modèles ayant une épaisseur qui varie .....	105
5.8	Prédiction du module d'Young des fibres de chanvre et de coco.....	109
CONCLUSION.....		111
RECOMMANDATIONS .....		113
ANNEXE I	CARACTÉRISTIQUES DE LA RÉSINE WC-575 .....	115
ANNEXE II	PARAMÈTRES DE DÉCOUPES DES FIBRES AU LASER.....	117
ANNEXE III	PROGRAMME MATLAB.....	119
ANNEXE IV	FRACTION VOLUMIQUE SUIVANT TROIS TYPES D'ARRANGEMENT POUR UNE GÉOMÉTRIE AYANT UNE SECTION CIRCULAIRE.....	123
ANNEXE V	PROGRAMME MATLAB POUR CALCULER LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA FIBRE ÉLÉMENTAIRE DE COCO OÙ L'AMF EST ÉGAL À 40° .....	125
BIBLIOGRAPHIE.....		129



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Composition chimique de quelques fibres naturelles .....9
Tableau 1.2	Plage des propriétés élastiques des divers composants des fibres végétales .....16
Tableau 1.3	Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales .....18
Tableau 1.4	Plage de la composition de la fibre de chanvre.....24
Tableau 1.5	Plage de la composition de la fibre de coco.....26
Tableau 3.1	Diamètre externe des fibres de coco observées .....50
Tableau 3.2	Diamètre du lacuna des fibres de coco .....51
Tableau 3.3	Nombre de fibres élémentaires pour chacune des coupes de la fibre de coco .....52
Tableau 3.4	Diamètres du lumen des plus grandes fibres élémentaires .....54
Tableau 3.5	Diamètres du lumen des plus petites fibres élémentaires observées.....55
Tableau 3.6	Épaisseurs des fibres élémentaires présentées dans le tableau 4.4 (1) et dans le tableau 4.5 (2) .....56
Tableau 3.7	Observation des fibres élémentaires de chanvre .....62
Tableau 4.1	Propriétés mécaniques des composants de la paroi de la fibre végétale....73
Tableau 4.2	La composition de la paroi de la fibre de chanvre et de coco .....74
Tableau 4.3	Les propriétés élastiques des microfibrilles et de la matrice composant le coco .....75
Tableau 4.4	Composition de la paroi de la fibre de chanvre .....75
Tableau 4.5	Propriétés élastiques des microfibrilles et de la matrice composant le chanvre.....76
Tableau 5.1	Propriétés mécaniques des fibres de chanvre selon plusieurs études .....87
Tableau 5.2	Résultats du module d'Young de la fibre élémentaire moyennée de coco et de chanvre.....89

Tableau 5.3	Module d'Young pour les fibres élémentaires de chanvre et de coco suivant les cinq types de modèles .....109
-------------	---



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Classification des fibres naturelles.....6
Figure 1.2	La structure de la paroi d'une fibre élémentaire végétale élémentaire.....7
Figure 1.3	(a) schéma d'une fibre élémentaire montrant l'angle des microfibrilles. (b) Structure de la chaîne cellulosique.....8
Figure 1.4	Schéma des fibrilles et des microfibrilles dans une fibre végétale .....10
Figure 1.5	Modèle théorique d'une coupe longitudinale d'une fibrille.....11
Figure 1.6	Structure de la cellulose .....12
Figure 1.7	Exemple de structure chimique de la lignine .....14
Figure 1.8	Structure chimique de l'hémicellulose (xylogucanes) .....15
Figure 1.9	Structure d'une chaîne de pectine (acide polygalacturonique).....15
Figure 1.10	Zone de défauts sur des fibres de chanvre .....19
Figure 1.11	Plantation de chanvre.....21
Figure 1.12	Coupe transversale de la tige de chanvre.....22
Figure 1.13	Coupe transversale d'une tige de chanvre .....22
Figure 1.14	Coupe transversale d'une fibre de coco.....25
Figure 2.1	Le microscope à balayage électronique Hitachi SU-8230.....32
Figure 2.2	Échantillon de paraffine contenant des fibres de chanvre .....33
Figure 2.3	Coupe de l'échantillon à base de paraffine au microtome.....34
Figure 2.4	Échantillon de polyester contenant les fibres de chanvre .....36
Figure 2.5	Coupe de l'échantillon sous azote liquide .....37
Figure 2.6	Échantillons de plusieurs amas de chanvre placés sur des pastilles .....39
Figure 2.7	Observations de fibres de chanvres coupées à l'aide d'un couteau à lame rétractable.....39

Figure 2.8	Precision Cutter avec une scie diamantée.....	41
Figure 2.9	Coupe transversale d'une fibre de chanvre gelée dans la résine d'époxy..	43
Figure 2.10	Morphologie d'une fibre de chanvre suite à une coupe au laser .....	44
Figure 3.1 :	Six coupes d'une même fibre de coco .....	48
Figure 3.2	Zoom sur des fibres de coco .....	53
Figure 3.3	Coupe d'une section d'une fibre de chanvre.....	58
Figure 3.4	Observation de plusieurs fibres de chanvre .....	59
Figure 3.5	Coupe de plusieurs fibres de chanvre .....	60
Figure 3.6	Coupe d'une fibre de chanvre.....	60
Figure 4.1	Schéma simplifié d'une fibre végétale .....	64
Figure 4.2	État de contraintes longitudinales .....	64
Figure 4.3	Exemple de modélisation d'une fibre de coco .....	77
Figure 4.4	Géométrie des modèles numériques avec une section circulaire (a) et une section elliptique (b) pour le coco .....	79
Figure 4.5	Géométrie des modèles numériques avec une section circulaire (a) et une section elliptique (b) pour le chanvre.....	79
Figure 4.6	Schéma représentatif d'une fibre de coco .....	80
Figure 4.7	Système de coordonnées sous <i>ACP</i> .....	81
Figure 4.8	Propriétés mécaniques de la fibre élémentaire de chanvre .....	81
Figure 4.9	Propriétés mécaniques de la fibre élémentaire de coco .....	81
Figure 4.10	Système de coordonnées sous <i>Mechanical</i> .....	82
Figure 4.11 :	Maillage pour un modèle de forme circulaire.....	83
Figure 4.12	Maillage pour un modèle de forme elliptique.....	83
Figure 4.13	Conditions initiales imposées aux modèles : le déplacement imposé (a) et section fixe (b) .....	84
Figure 5.1	Courbe contrainte-déformation d'un amas de chanvre.....	86

Figure 5.2	Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de chanvre suivant le diamètre du lumen pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b).....	90
Figure 5.3	Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant le diamètre du lumen pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b) .....	91
Figure 5.4	Pourcentage d'écart entre les valeurs obtenues pour une section circulaire et pour une section elliptique .....	91
Figure 5.5	Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant l'AMF pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b).....	93
Figure 5.6	Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant l'AMF pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b).....	93
Figure 5.7	Pourcentage d'écart entre les valeurs obtenues pour une section circulaire et pour une section elliptique .....	94
Figure 5.8	Variation du module d'Young suivant les dimensions du lumen avec différentes épaisseurs de la paroi de la fibre élémentaire de chanvre pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b) .....	95
Figure 5.9	Variation du module d'Young suivant les dimensions du lumen avec différentes épaisseurs de la paroi de la fibre élémentaire de coco pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b).....	95
Figure 5.10	Différents types d'arrangement des microfibrilles : soit triangulaire (a) ou carré (b).....	97
Figure 5.11	Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de chanvre suivant le pourcentage de cellulose cristalline pour un arrangement triangulaire des fibrilles dans la fibre pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b) .....	98
Figure 5.12	Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant le pourcentage de cellulose cristalline pour un arrangement triangulaire des fibrilles dans la fibre pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b) .....	98
Figure 5.13	Pourcentage d'écart entre les valeurs obtenues pour une section circulaire et pour une section elliptique pour un $V_f = 0,785$ (a) et pour un $V_f = 0,907$ (b) .....	99

Figure 5.14	Contraintes dans la fibre élémentaire de chanvre ayant une épaisseur constante .....	103
Figure 5.15	Déformations de la fibre élémentaire de chanvre ayant une épaisseur constante .....	104
Figure 5.16	Contraintes dans la fibre élémentaire de coco ayant une épaisseur constante .....	104
Figure 5.17	Déformations de la fibre élémentaire de coco ayant une épaisseur constante .....	105
Figure 5.18	Contrainte dans la fibre élémentaire de chanvre du type III .....	107
Figure 5.19	Déformation de la fibre élémentaire de chanvre du type III .....	107
Figure 5.20	Contrainte dans la fibre élémentaire de coco du type II .....	108
Figure 5.21	Déformation de la fibre élémentaire de coco du type II .....	108

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AC	Cellulose amorphe
AMF	Angle des microfibrilles
CC	Cellulose cristalline
ÉTS	École de Technologie Supérieure
HC	Hémicellulose
LG	Lignine
MEB	Microscope électronique à balayage



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$E$	Le module d'Young du matériau
$E^L$	Le module d'Young longitudinal du pli
$E^T$	Le module d'Young transversal du pli
$E_{ac}$	Le module d'Young longitudinal de la cellulose amorphe
$E_{cc}^L$	Le module d'Young longitudinal de la cellulose cristalline
$E_{cc}^T$	Le module d'Young transversal de la cellulose cristalline
$E_f^L$	Le module d'Young longitudinal des microfibrilles
$E_f^T$	Le module d'Young transversal des microfibrilles
$E_{hc}^L$	Le module d'Young longitudinal de l'hémicellulose
$E_{hc}^T$	Le module d'Young transversal de l'hémicellulose
$E_L$	Le module d'Young longitudinale
$E_{lg}$	Le module d'Young longitudinal de la lignine
$E_{mat}^L$	Le module d'Young longitudinal de la matrice
$E_{mat}^T$	Le module d'Young transversal de la matrice
$E_P$	Le module d'Young de la couche P
$E_{S1}$	Le module d'Young de la couche S <sub>1</sub>
$E_{S2}$	Le module d'Young de la couche S <sub>2</sub>
$E_{S3}$	Le module d'Young de la couche S <sub>3</sub>
$G^{LT}$	Le module de cisaillement du pli
$G_{ac}$	Le module de cisaillement de la cellulose amorphe
$G_{cc}^{LT}$	Le module de cisaillement de la cellulose cristalline
$G_f^{LT}$	Le module de cisaillement des microfibrilles
$G_{hc}^{LT}$	Le module de cisaillement de l'hémicellulose
$G_{lg}$	Le module de cisaillement de la lignine
$G_{mat}^{LT}$	Le module de cisaillement de la matrice
$P_{cc}$	Le pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose

$V_{ac}$	La fraction volumique de la cellulose amorphe dans la couche S <sub>2</sub>
$V_{cc}$	La fraction volumique de la cellulose cristalline dans la couche S <sub>2</sub>
$V_{hc}$	La fraction volumique de l'hémicellulose dans la couche S <sub>2</sub>
$V_{lg}$	La fraction volumique de la lignine dans la couche S <sub>2</sub>
$V_P$	La fraction volumique de la couche P
$V_{S1}$	La fraction volumique de la couche S <sub>1</sub>
$V_{S2}$	La fraction volumique de la couche S <sub>2</sub>
$V_{S3}$	La fraction volumique de la couche S <sub>3</sub>
$W_{ac}$	La fraction massique de la cellulose amorphe dans la couche S <sub>2</sub>
$W_{cc}$	La fraction massique de la cellulose cristalline dans la couche S <sub>2</sub>
$W_{hc}$	La fraction massique de l'hémicellulose dans la couche S <sub>2</sub>
$W_{lg}$	La fraction massique de la lignine dans la couche S <sub>2</sub>
$W_{matrice}$	La fraction massique de la matrice dans la couche S <sub>2</sub>
$W_{microfibrille}$	La fraction massique des microfibrilles dans la couche S <sub>2</sub>
$\epsilon$	Déformation du matériau
$\nu^{TL}$	Le coefficient de Poisson du pli
$\nu_{ac}$	Le coefficient de Poisson de la cellulose amorphe
$\nu_{cc}^{TL}$	Le coefficient de Poisson de la cellulose cristalline
$\nu_f^{TL}$	Le coefficient de Poisson des microfibrilles
$\nu_{hc}^{TL}$	Le coefficient de Poisson de l'hémicellulose
$\nu_{lg}$	Le coefficient de Poisson de la lignine
$\nu_{mat}^{TL}$	Le coefficient de Poisson de la matrice
$\rho_{ac}$	La masse volumique de la cellulose amorphe
$\rho_{cc}$	La masse volumique de la cellulose cristalline
$\rho_{hc}$	La masse volumique de l'hémicellulose
$\rho_{lg}$	La masse volumique de la lignine
$\rho_{matrice}$	La masse volumique de la matrice
$\rho_{microfibrille}$	La masse volumique des microfibrilles
$\sigma$	Contrainte du matériau



## INTRODUCTION

Aujourd'hui, dans un monde toujours plus ouvert aux énergies propres et aux matériaux recyclables, les industrielles, qu'elles soient dans le domaine de l'aérospatiale, du ferroviaire, du naval, de l'automobile ou du bâtiment, s'intéressent aux performances mécaniques de composites polymères renforcées par des fibres naturelles, et notamment celles à base de cellulose telle que le kénaf, le lin, le chanvre ou encore le coco (Rowell et Anand, 1997).

Bien que les matériaux à fibres naturelles soient utilisés dans ces domaines, ils présentent quelques défauts à surmonter. D'une part, la température des fibres végétales est assez faible, aux alentours de 300°C (Rowell et Anand, 1997). D'autre part, les fibres végétales sont connues pour avoir une résistance très faible à l'absorption en humidité (Ho Thi, 2008). Enfin, le dernier problème rencontré est issu de la difficulté aux fibres végétales d'adhérer à la matrice. Ces trois défauts freinent l'utilisation des fibres végétales dans l'industrie, comme renfort de composites.

Malgré cela, le nombre d'études qui portent sur les fibres végétales ne cesse de s'accroître depuis les dernières décennies. En effet, ces fibres végétales, comme le lin ou le chanvre, ont d'excellentes propriétés mécaniques, pouvant même dépasser celles des fibres de verre (Bodros et al., 2007). Cependant, pour un matériau composite, les propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre sont très importantes. Par exemple, le module d'élasticité va dépendre de celui de la fibre, alors que les propriétés lors de la résistance en traction vont être sensibles aux propriétés de la matrice. Même si cette résistance en traction peut être améliorée en respectant certaines conditions telles que, la teneur en volume de fibre, le ratio de la longueur et du diamètre de la fibre ( $L/D$ ), l'orientation de fibres dans la matrice ou encore, l'adhésion fibres/matrice, qui peut quant à elle être améliorée grâce à des traitements ou des agents de couplage (Balet, 2013).

C'est dans le domaine automobile, pour des composants non structuraux tels que les garnitures de portières, les habillages de coffres (Thomas, 2000), ou dans le bâtiment qui s'effectue surtout en Europe, en Amérique du Nord et en Asie (Bledzki et Gassan, 1999), que les fibres de chanvre sont utilisées comme renfort de matières plastiques. En effet, ces fibres, grâce à leur dureté et à leur résistance spécifique élevée, sont utilisées dans la fabrication de matériaux composites structuraux. En revanche, les fibres de coco, au vu de leurs performances assez faibles comme renfort et leur pourcentage de cellulose faible (Bismarck et al, 2005), sont utilisées pour le contrôle de l'érosion, le renforcement ou la stabilité des sols, où elles présentent des propriétés plus avantageuses.

Jusqu'à présent, peu de modélisations ont été faites sur les fibres végétales, hormis sur les fibres de bois qui ont fait l'objet de nombreuses études. Cela est dû à la complexité de la morphologie de ces fibres ainsi qu'à leur composition chimique, qui varient en fonction du lieu où elles ont été cultivées, de la durée de croissance avant le prélèvement des fibres, et même des conditions météorologiques lors de leurs croissances (Nykter et al. 2008). En effet, de nombreuses études expérimentales ont été faites sur le module d'Young, mais il existe peu de modèles numériques. C'est en cela que ce mémoire va essayer de répondre en comprenant, numériquement, l'influence de la composition chimique et de la morphologie des fibres végétales sur le module d'Young.

## **Objectifs de la maîtrise**

Le but général de cette recherche est d'effectuer une modélisation des fibres élémentaires de coco et de chanvre sous ANSYS. Pour ensuite connaître des relations entre le module d'Young de ces fibres élémentaires et différents critères comme la morphologie et la composition chimiques de ces deux fibres. Pour cela, une étude portant sur la morphologie, en observant chacune des deux fibres sera faite. Ensuite, un modèle numérique pour les fibres de chanvre et de coco sera établi : ce modèle comportera des caractéristiques moyennes prélevées sur les observations et dans d'autres études. Pour finir, après avoir vérifié la cohérence du modèle avec des valeurs obtenues lors d'essais en traction, ces modèles seront

étudiés avec différentes compositions chimiques afin d'établir des relations entre ces paramètres et le module d'Young.

### **Présentation des chapitres**

Une revue détaillée de la littérature sur les fibres végétales focalisée sur les fibres de chanvre et de coco, leur comportement en traction ainsi que leur composition chimique sera expliquée, dans le chapitre 1. Le chapitre 2 présentera les méthodes expérimentales qui ont permis de couper la fibre de chanvre en minimisant les impacts de la coupe sur sa morphologie. À la suite de ces observations, une interprétation sur la morphologie des fibres de chanvre et de coco, par rapport à des observations faites par d'autres études, sera détaillée dans le chapitre 3. Le chapitre 4 permettra d'établir un modèle numérique des fibres de coco et de chanvre, en fonction des observations faites et en calculant la composition chimique du chanvre et du coco suivant la loi des mélanges. Enfin, le chapitre 5 consistera en une interprétation des résultats du module d'Young obtenu en modifiant certains paramètres. Ce mémoire se s'achèvera par une brève conclusion et quelques recommandations.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

#### 1.1 Les fibres naturelles

Comme évoqué dans l'introduction, l'utilisation des fibres naturelles a pour but futur de remplacer les fibres artificielles telles que les fibres de verre, les fibres de carbone ou encore les fibres d'aramide, comme le Kevlar, pour arriver à des matériaux biodégradables dans la plupart des domaines. Pour mieux connaître ces fibres naturelles, une petite introduction va suivre afin de présenter les différents types de fibres.

Actuellement, la classification des fibres naturelles se fait en trois grandes familles. Celles-ci sont énumérées en fonction de l'origine des fibres, comme le présente la figure 1.1 (Baley, 2013). Pour ce mémoire, seules les fibres végétales seront expliquées dans ce chapitre, et plus particulièrement, les fibres de chanvre et de coco. Ces trois familles sont :

- Les **fibres végétales**. Ces fibres sont extraites de plusieurs parties du végétal :
  - (1) Les fibres provenant des poils séminaux de graines de la plante.
  - (2) Les fibres provenant de la tige de la plante. Ces fibres sont aussi appelées « fibres libériennes ».
  - (3) Les fibres provenant des feuilles, du tronc, ou encore de l'enveloppe du fruit.
- Les **fibres animales**, qui proviennent soit de poils, tels que la toison animale, soit des sécrétions ;
- Les **fibres minérales**.

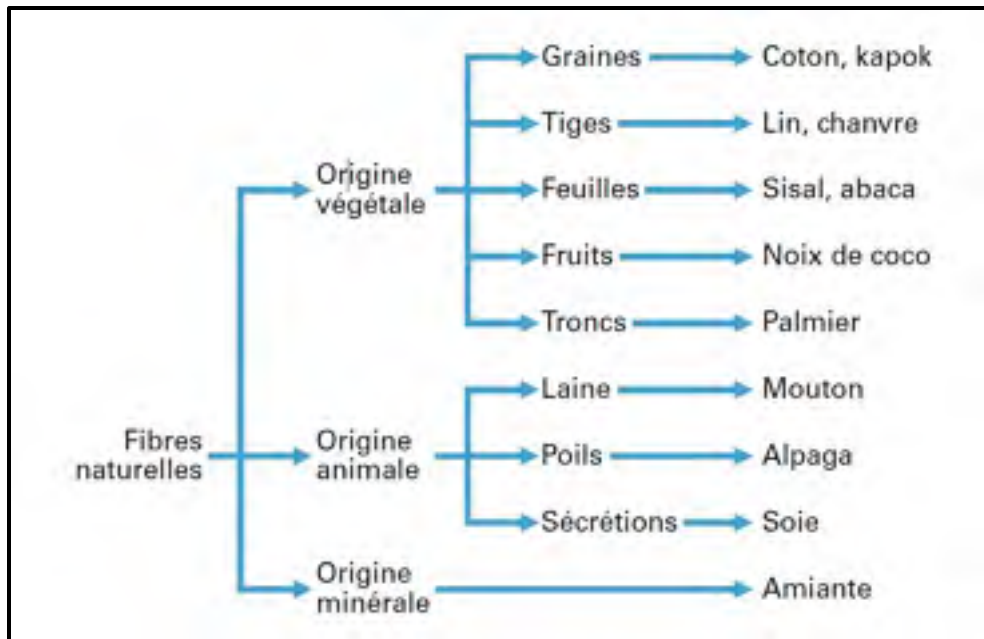


Figure 1.1 Classification des fibres naturelles  
Tirée de Baley (2013, p. 4)

## 1.2 La morphologie des fibres végétales

La fibre végétale, présentée sur la figure 1.3a est constituée d'un lumen, un vide se situant au milieu de la fibre et d'une paroi plus ou moins épaisse suivant le type de fibre. Cette paroi est composée de quatre plis : la paroi primaire et les couches S1, S2 et S3, qui forment la paroi secondaire (figure 1.2). C'est ces différents plis qui vont assurer la rigidité des tissus et vont permettre le maintien de la forme de la fibre ainsi que la direction des cellules lors de la croissance de celle-ci (Brooker et al. 2008).

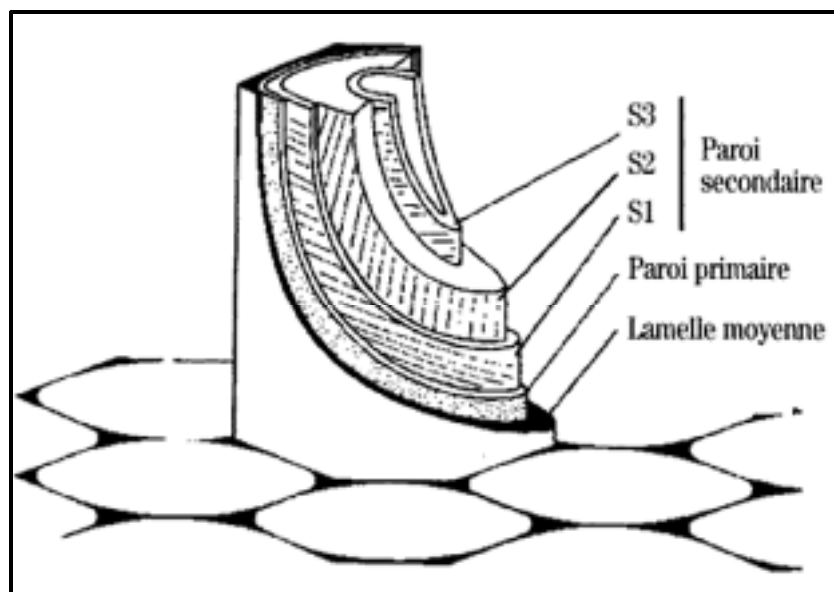


Figure 1.2 La structure de la paroi d'une fibre  
élémentaire végétale élémentaire  
Tirée de Brett et al. (1996)

De plus, chacune des couches est assimilée à un matériau composite, c'est-à-dire d'une matrice constituée d'hémicellulose, de lignine et de pectine, pour ne citer les composants les plus prépondérants dont les caractéristiques sont détaillées dans la partie 1.3.2, et de renforts nommés les fibrilles ou microfibrilles, dans le cas des fibres végétales. Ces fibrilles sont un ensemble de microfibrilles (figure 1.4), qui sont composées de cellulose cristalline et de cellulose amorphe (figure 1.3b). Pour la paroi de la fibre, sa composition est unique. En effet, la composition chimique de chacune des couches ou la direction de l'angle des microfibrilles (AMF) (figure 1.3a) dépendent du type de fibre. De plus, pour une même sorte de fibre, chacune des fibres élémentaires a une composition chimique différente (Burgert, 2006; Müssig and Stevens, 2010; Tomczak et al, 2007).

**La lamelle moyenne** est une couche qui se situe entre les fibres végétales qui permet le maintien des fibres entre elles (Vallade, 1999). Elle contient peu de cellulose, mais est riche en pectine (Bouloc, 2006).

**La paroi primaire** est la partie externe de la fibre unitaire. Elle a une épaisseur très faible, comprise entre 70 nm et 200 nm selon Bergander et Salmèn (2000) et Thygesen (2006). Les microfibrilles sont enchevêtrées dans une matrice composée d'hémicellulose et de pectine, afin de créer une continuité avec la lamelle moyenne (Vallade, 1999). Du fait du pourcentage de ces composants, la paroi primaire est une paroi très élastique, qui peut ainsi se déformer, ce qui permet à la paroi secondaire de se développer.

**La paroi secondaire** est la plus grande partie de la paroi de la fibre (figure 1.2). Elle est composée de plusieurs couches, S1, S2 et S3. Contrairement à la paroi primaire, les microfibrilles (figure 1.3a) présentes dans les couches de la paroi secondaire sont parallèles et suivent le même angle (Baley, 2013). Du fait que la couche S2 est la plus épaisse, elle représente environ 90% de l'épaisseur de la fibre (Placet et al., 2012) et elle caractérise le comportement mécanique de la fibre végétale. De plus, c'est dans cette couche que le taux de cellulose est le plus élevé (Placet, 2012). Ce taux de cellulose, en fraction massique, varie entre 70% et 90% (Baley, 2004; Placet et al., 2012)

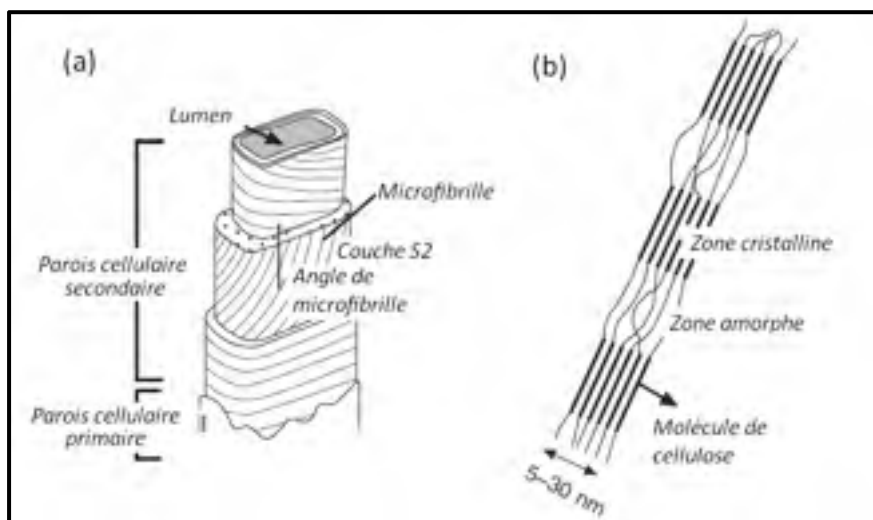


Figure 1.3 (a) schéma d'une fibre élémentaire montrant l'angle des microfibrilles. (b) Structure de la chaîne cellulosique  
Tirée de Baillie (2004)



### 1.3 La composition chimique des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont principalement formées de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Les proportions de chacun des composants dépendent, d'une part, de la nature du végétal, et d'autre part, des conditions de croissance du végétal : que ce soit lié à des événements météorologiques ou bien au lieu où le végétal a été cultivé ainsi qu'aux méthodes utilisées pour les extraire (Nykter et al. 2008).

Les fibres naturelles sont généralement hydrophiles, avec des proportions d'humidité non négligeables et qui peuvent être parfois très élevées suivant la provenance de la fibre (Mohanty et al., 2005). Le tableau 1.1 présente la fraction massique (wt) de chacun des compositions chimiques des fibres naturelles les plus fréquemment utilisées (Biagiotti et al., 2004).

Tableau 1.1 Composition chimique de quelques fibres naturelles  
Adapté de Biagiotti et al. (2004)

Fibres naturelles	Cellulose (wt. %)	Hémicellulose (wt. %)	Lignine (wt. %)	Pectine (wt. %)
Lin	60-81	14-18,6	2-3	1,8-2,3
Jute	51-72	12-20,4	5-13	0,2
Sisal	43-88	10-13	4-12	0,8-2
Kénaf	36	21	18	2
Ramie	68,6-76	13,1-15	0,6-1	1,9-2
Chanvre	70-78	17,9-22	3,7-5	0,9
Coton	82,7-92	2-5,7	0,5-1	5,7
Coco	43	0,3	45	4
Banane	60-65	6-19	5-10	3-5
Ananas	80-81	16-19	12	2-2,5
Bois	45-50	23	27	/

### 1.3.1 Fibrilles et microfibrilles

Chaque composant cité ci-dessus appartient à un élément précis de la fibre. Les fibrilles, qui servent de renfort dans chacune des couches de la paroi de la fibre végétale, sont un ensemble de plusieurs microfibrilles (figure 1.4), qui ont une forme circulaire et ayant un diamètre allant de 2 à 5 nm, pour une longueur d'environ 30 nm (Andersson et al., 2003). Chacune de ces microfibrilles est composée de chaînes cellulosiques, elles-mêmes formées de cellulose cristalline et de cellulose amorphe comme le montre en détail la figure 1.3b (Salmén et al., 2006).

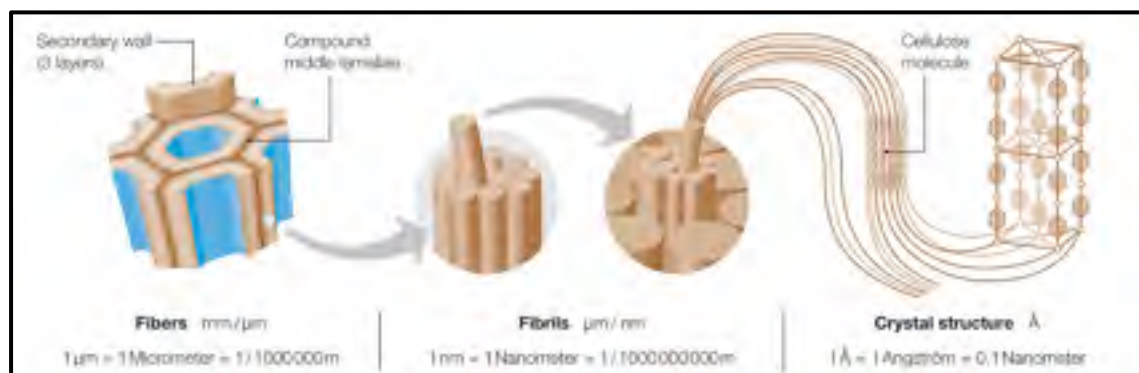


Figure 1.4 Schéma des fibrilles et des microfibrilles dans une fibre végétale  
Tirée de Zimmermann et al. (2004, p. 755)

Dans la littérature, le mot fibrilles est peu évoqué face aux microfibrilles qui composent les fibrilles. Celles-ci sont composées de cellulose et permettent notamment de déterminer leur angle par rapport à l'axe longitudinal de la fibre. Cette détermination se fait à l'aide de la méthode par diffraction de rayons X. C'est en connaissant l'angle de réflexion du rayon sur la cellulose cristalline que l'AMF est déterminé.

En 1993, Bodig et Jayne ont proposé une représentation d'une coupe longitudinale d'une fibrille (figure 1.5). Les éléments filiformes, présents sur cette figure représentent les molécules de celluloses, composées de régions cristallines (C) et de régions amorphes, qui

sont des régions plus et moins denses. Les autres molécules représentent l'hémicellulose, la lignine et des substances extractives.

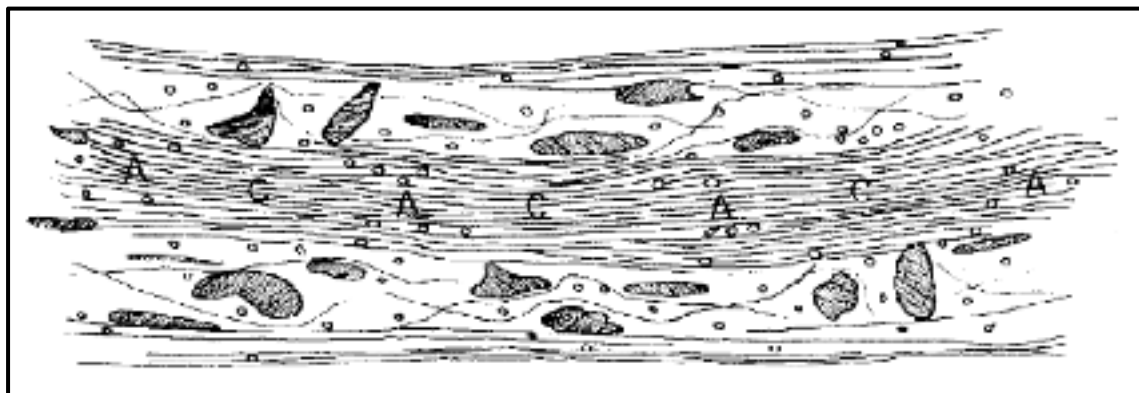


Figure 1.5      Modèle théorique d'une coupe longitudinale d'une fibrille  
Tirée de Bodig et Jayen (1993, p. 7)

#### 1.3.1.1 La cellulose

La cellulose est l'élément le plus important dans la paroi des fibres végétales puisqu'elle compose les microfibrilles, qui sont à l'origine des propriétés exceptionnelles des fibres végétales. La molécule de cellulose, montrée sur la figure 1.6 est un polymère monotone uniquement constitué de cellobiose. On la trouve sous forme d'un polysaccharide homopolymère linéaire  $(C_6H_{10}O_5)_n$  constitué de successions d'unités D-anhydroglucose connectées entre elles par des liaisons  $\beta$ -1,4-glycosidiques (Baillie, 2004). Il faut savoir qu'il existe deux formes de cellulose :

- Cellulose I : c'est la cellulose naturelle obtenue directement à partir des plantes, et qui sera traitée dans cette partie ;
- Cellulose II ou cellulose régénérée : elle est obtenue par dissolution dans différents solvants.

Dans la cellulose pure, la structure moléculaire est presque parfaitement régulière, car elle ne contient que peu de défauts, environ une unité sur mille. Après des analyses cristallographiques sur la cellulose I, deux types de structures cristallines I $\alpha$  et I $\beta$  ont été découverts (Perez et al., 2010). Ces deux structures sont la cellulose cristalline et la cellulose amorphe présentes dans les chaînes cellulosiques. La cellulose amorphe représente les défauts de la cristallinité et les zones paracristallines qui correspondent à la partie plus désordonnée de la cellulose. Les groupes hydroxyles (OH) sont susceptibles d'être impliqués dans la formation de liaisons intra et inter chaînes de cellulose et confèrent à celle-ci ses propriétés mécaniques (rigidité et résistance) (Angles et Dufresne, 2001). De plus, les liaisons hydrogène entre ces chaînes ont une forte densité permettant une orientation des zones cristallines et empêchant la pénétration de solvants.

Le taux de cristallinité constaté dans la cellulose est assez aléatoire. De nombreuses études ont été menées pour le connaître. Il serait estimé entre 54% et 88% (Moon et al., 2011), selon le type de source. Tout comme les propriétés mécaniques, le pourcentage de cristallinité dans les microfibrilles dépend de diverses conditions telles que la zone de récolte, la méthode d'extraction des fibres végétales, ou encore les divers traitements thermiques et chimiques qui lui sont appliqués.

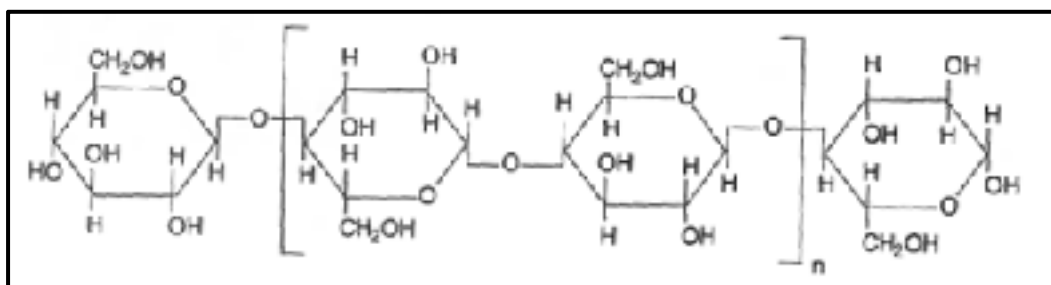


Figure 1.6 Structure de la cellulose  
Tirée de Mohanty et al (2005, p.8)

### **1.3.2 La partie amorphe de la paroi de la fibre**

Cette partie de la paroi de la fibre a des propriétés mécaniques inférieures à celles des fibrilles. Elle est considérée comme un matériau isotrope au vu de ses composants, qui sont l'hémicellulose, la lignine et la pectine.

#### **1.3.2.1 La lignine**

La lignine est un polymère hydrocarboné ayant une structure très complexe en trois dimensions et est constituée d'éléments aliphatiques et aromatiques, comme le montre la figure 1.7. La lignine, jouant le rôle de gaine entourant les microfibrilles, améliore la résistance à la compression de la fibre végétale (Eichhorn et al., 2001).

La lignine joue le rôle de matrice et permet aux plantes d'avoir une structure. La lignine est répartie à travers les parois cellulaires primaires et secondaires. Et c'est dans la lamelle mitoyenne où la concentration de lignine est la plus forte. La lignine, grâce à sa structure, fait barrage à l'eau, limitant ainsi sa pénétration à travers les parois cellulaires.

L'élimination de la lignine devient donc souhaitable pour obtenir les fibres unitaires est ainsi, avoir de meilleures propriétés mécaniques pour les matériaux composites à base de ces fibres. La lignine est considérée comme un polymère thermoplastique, présentant une température de transition vitreuse de l'ordre de 90°C et une température de fusion d'environ 170°C (Thomas et al., 2011). La lignine est aussi sensible aux UV ainsi qu'aux agents chimiques. Avec certains traitements d'élimination de l'eau dans les parois cellulaires des fibres, comme le séchage, la lignine peut être éliminée (Kaciket et al., 2006).

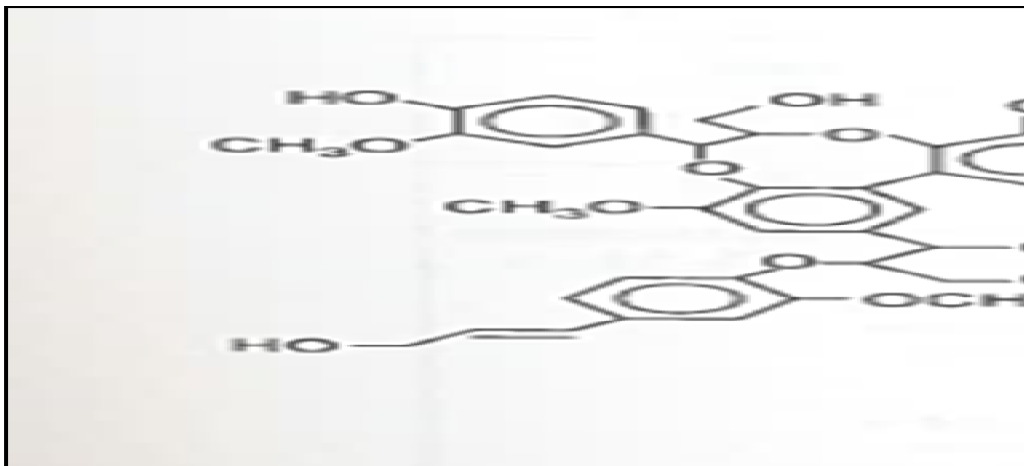


Figure 1.7 Exemple de structure chimique de la lignine  
Tiré de Mohanty et al (2005, p.9)

### 1.3.2.2 L'hémicellulose

L'hémicellulose est un composant chimique qui est constitué de polysaccharides tels que la D-xylopyranose, la D-glocopyranose ou encore la D-galactopyranose pour n'en citer que quelques-uns. Ces polysaccharides sont présents sous forme de chaînes courtes et hautement ramifiées. Contrairement à la cellulose, l'hémicellulose a une multiple variété de saccharides constituant ce polymère qui diffèrent d'un type de végétal à un autre. De plus, le degré de polymérisation dans l'hémicellulose est inférieur à celui de la cellulose. Ce rapport peut aller de 20 à 300 (Thygesen, 2006).

L'hémicellulose a une structure présentant un nombre considérable de ramifications de chaînes. Cette particularité est unique à l'hémicellulose, la cellulose étant un polymère ayant une structure linéaire. Aussi, l'hémicellulose se présente peu sous forme cristalline et se caractérise par sa solubilité dans des solutions alcalines et par son insolubilité dans l'eau. Ces dernières caractéristiques ont pour conséquence d'augmenter le risque de la dégradation de la fibre sous l'effet des agents extérieurs (bactéries, acides..., etc.). La xyloglucanes est la classe d'hémicellulose la plus courante. Sa structure est représentée sur la figure 1.8.

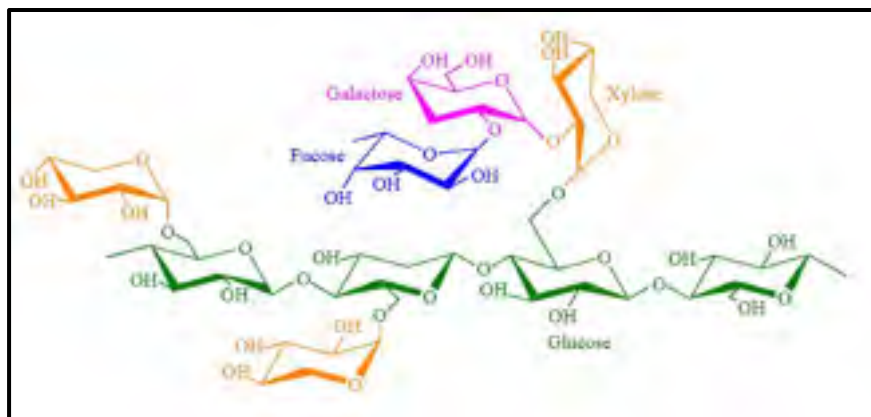


Figure 1.8 Structure chimique de l'hémicellulose (xylogucanes)  
Tirée de Sedan (2007, p. 12)

### 1.3.2.3 La pectine

La pectine est un composant chimique regroupant les hétéropolysaccharides se situant généralement dans la paroi cellulaire primaire des fibres végétales, à l'exception des fibres de bois. En raison de la présence de groupes acide carboxylique, la pectine est le composant le plus hydrophile dans les fibres végétales. La structure de la pectine va dépendre de l'espèce où sont extraites les fibres végétales. Les proportions de celle-ci diffèrent en fonction de leur position dans la paroi cellulaire (Sakakibara, 1980). La figure 1.9 présente un exemple de la structure de la pectine.

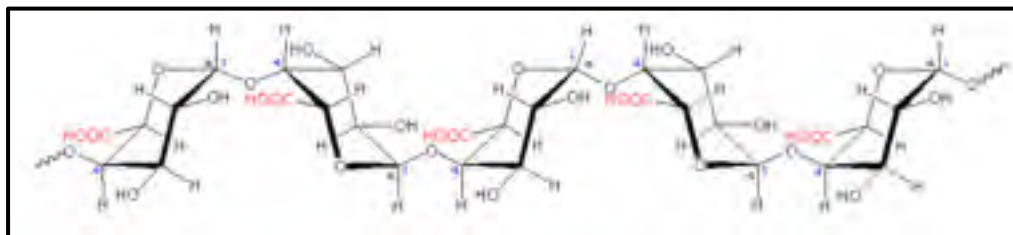


Figure 1.9 Structure d'une chaîne de pectine (acide polygalacturonique)  
Tirée de de Sedan (2007, p. 13)

### 1.3.3 Les caractéristiques mécaniques de chaque composant de la paroi de la fibre

Maintenant que la composition chimique des fibres végétales est établie, il est important de connaître les caractéristiques mécaniques de chacun des composants vus précédemment pour en déduire le module d'Young de la fibre végétale. Toutefois, au vu des différentes valeurs obtenues par les chercheurs sur chacun des composants, une plage des valeurs obtenues est répertoriée dans le tableau 1.2. Seules la cellulose cristalline, la cellulose amorphe, l'hémicellulose et la lignine sont données. En effet, les propriétés de la pectine sont négligeables par rapport aux autres d'une part, et d'autre part, au vu de son faible pourcentage massique dans la paroi, la pectine ne sera pas prise en compte dans ce mémoire. Le chapitre 5 donnera plus de détails sur ces raisons.

Tableau 1.2 Plage des propriétés élastiques des divers composants des fibres végétales  
Tirée de Placet et al. (2012)

Composants	Cellulose cristalline	Cellulose amorphe	Hémicellulose	Lignine
$E_L$ (GPa)	74 - 168	8,45 – 10,42	7 - 8	2 - 4
$E_T$ (MPa)	27 200	8,45 – 10,42	3 500 – 4 000	2 - 4
$G_{LT}$ (MPa)	4 400	4 240 - 5900	1 750	760
$\nu_{LT}$	0,1 – 0,2	0,23	0,2	0,3 – 0,33
Densité	1,6	1,42	1,4	1,4



## 1.4 Composite à base de fibres naturelles

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux se justifie par deux raisons. D'une part, pour valoriser une région d'un pays industrialisé ou peu industrialisé : les fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles. Et d'autre part, pour développer des matériaux et des technologies prenant en compte l'impact sur l'environnement. En effet, les fibres naturelles produisent peu de déchets, et nécessitent peu de produits chimiques lors de leur croissance.

Le choix des fibres provenant d'un milieu naturel et présentant des performances mécaniques intéressantes est guidé par :

- Leur origine et leur fonction ;
- Leur disponibilité ;
- Leur composition et leur structure souvent complexe.

Les fibres naturelles sont biodégradables et doivent le rester même à la suite des traitements qu'elles subissent pour une application de renfort d'un matériau composite. Toutefois, ce traitement peut avoir une influence sur la vitesse de dégradation. Le résultat de cette décomposition des fibres naturelles est la formation d'eau, de dioxyde de carbone, de méthane et éventuellement la formation de sous-produits non toxiques pour l'environnement. Ces fibres sont considérées comme neutres vis-à-vis des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère puisque leur combustion ou leur biodégradation ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbé pendant sa croissance. Les objets en composites à fibres naturelles sont donc plus faciles à recycler et, si leur matrice est biodégradable, ils sont compostables après broyage.

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont en cours d'élaboration pour remplacer les matériaux traditionnels et même si leurs applications demeurent encore limitées, elles devraient rapidement s'élargir dans le futur. Le tableau 1.3 présente les avantages et inconvénients des fibres végétales comme renfort de matériaux composites.

Tableau 1.3 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodégradable</li> <li>• Neutre pour l'émission de CO<sub>2</sub></li> <li>• Pas de résidus après incinération</li> <li>• Ressource renouvelable</li> <li>• Propriétés mécaniques spécifiques importantes (rigidité, résistance)</li> <li>• Non abrasif pour les outillages</li> <li>• Demande peu d'énergie pour être produite</li> <li>• Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres</li> <li>• Bon isolant thermique et acoustique</li> <li>• Faible coût</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorption d'eau</li> <li>• Fibres anisotropes</li> <li>• Faible stabilité dimensionnelle</li> <li>• Faible tenue thermique (200 à 300°C max)</li> <li>• Variation de la qualité en fonction des conditions météorologiques pendant la croissance du végétal</li> <li>• Renfort discontinu</li> </ul>

### 1.5 Le comportement des fibres végétales en traction

Au vu des études qui seront menées lors de cette étude, il est judicieux de s'intéresser au comportement des fibres végétales lors d'un essai en traction. Comme cela a été précisé dans une partie précédente, la fibre végétale étant composée de quatre plis renforcés par les fibrilles, l'orientation de ces fibrilles par rapport à l'axe de la fibre et le comportement des fibrilles entre elles ont un impact sur la rigidité de la fibre lors des essais en traction. C'est grâce à cela que les fibres végétales ont des performances élevées. Cependant, contrairement aux matériaux fabriqués par l'homme, les fibres végétales sont naturelles et de fait, aucune des fibres végétales n'est identique. Ainsi, bien que les fibres soient uniques, elles possèdent un certain nombre de défauts. Ces défauts dits transversaux ou de plissement (Balet, 2013), qui sont visibles sur la figure 1.10, apparaissent sous une sollicitation en compression et sont

dus à un flambage des fibrilles (Bos et al., 2002). Ils ont pour conséquence d'affaiblir la fibre lors d'essai en traction.



Figure 1.10 Zone de défauts sur des fibres de chanvre  
Tirée de Balet (2013, p.11)

En plus des critères cités ci-dessus, il existe un grand nombre de défauts sur les fibres végétales qui vont plus ou moins interagir sur le module d'Young et sur la contrainte à la rupture. Ces paramètres sont (Wakelyn et al., 2006) :

- La composition et la structure de la fibre ;
- La section qui varie selon la longueur de la fibre ;
- La maturité de la plante lors de l'extraction des fibres ;
- Le pourcentage d'humidité présent dans la fibre ;
- La zone de prélèvement dans la plante pour les fibres dites libériennes ;
- Les conditions dues à la zone de culture des végétaux (Liu et al., 2015) ;
- Les méthodes d'extraction des fibres ;
- Le montage des fibres sur les éprouvettes ;

- Les conditions de la pièce où s'effectuent les essais, comme la température et l'humidité ;
- Le rapport force-vitesse utilisé lors du test.

Tous ces critères ont pour conséquence de modifier la contrainte limite en traction et le pourcentage de déformation de la fibre.

## **1.6 La morphologie des deux fibres végétales**

### **1.6.1 Le chanvre**

L'Homme s'est intéressé à cette plante depuis des milliers d'années pour ses propriétés psychotropes. Au cours des siècles derniers, l'Homme a commencé à utiliser les fibres de chanvre pour des usages dans le textile, avant de les remplacer par des plantes tropicales, dans les années 60. Cela a eu pour conséquence de limiter la culture et la commercialisation, sans compter qu'une très faible différence est faite entre la culture du chanvre industriel et celle de la drogue (West, 1998). C'est à la suite de la découverte de nouvelles variétés de chanvre, et à une législation moins stricte que la culture du chanvre a pu reprendre notamment en Chine, en France, au Chili et en Russie (Bismarck et al., 2005). Actuellement, il est utilisé pour la fabrication de papiers spéciaux, et dans le textile, mais également dans des panneaux de particules pour l'ameublement, l'isolation et la construction.

Le chanvre (*Cannabis sativa* L., Cannabaceae) est une plante originaire d'Asie centrale. Au fil des années, il s'est répandu à travers toute l'Asie dont la Chine et le bassin méditerranéen, en particulier, en France et en Italie. Les plantes de chanvre sont des plantes herbacées à feuilles palmées, pouvant atteindre une hauteur de 3 à 5m (figure 1.11).



Figure 1.11 Plantation de chanvre

La culture du chanvre nécessite peu d'entretien, et peu de produits chimiques, tels que les pesticides, les herbicides ou encore les engrais. Ceci est dû au fait que ces plantes empêchent le développement des mauvaises herbes et des agents pathogènes et participent ainsi au renouvellement des sols pour les prochaines récoltes (Bismarck et al., 2005).

#### **1.6.1.1 De la plante à la tige**

La tige de la plante de chanvre est constituée essentiellement d'un noyau ligneux (xylème), entouré d'une écorce externe (cambium), d'une couche interne composée de faisceaux de fibres libériennes (phloème), du cortex et de l'épiderme (Figure 1.12).

Le rôle du noyau offre la rigidité à la plante tandis que les faisceaux de fibres libériennes permettent à la plante de résister en traction et en flexion. Deux types de fibres libériennes peuvent être extraits : soit des couches intérieures, soit des couches extérieures. Ces couches sont nommées respectivement fibres primaires et fibres secondaires (Figure 1.12).

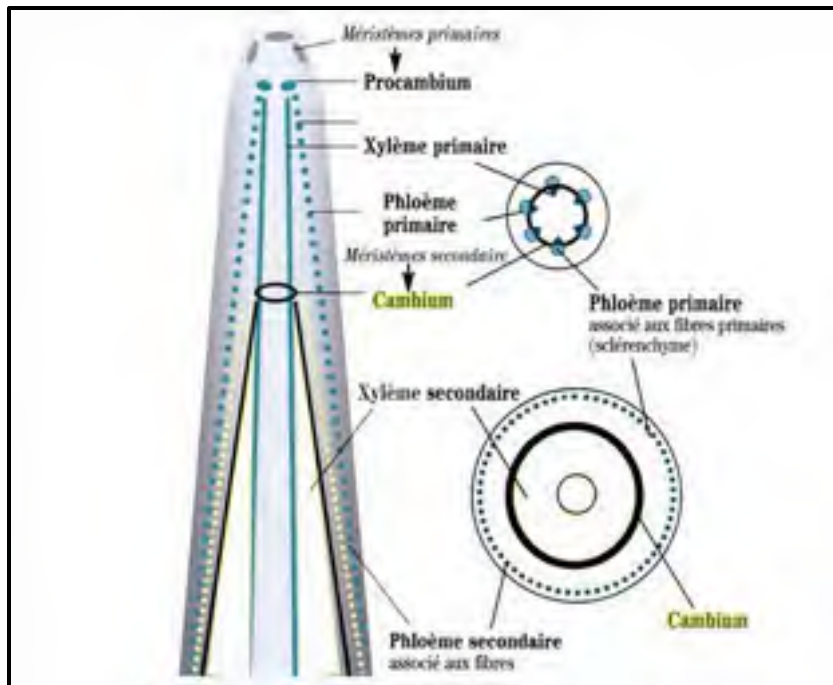


Figure 1.12 Coupe transversale de la tige de chanvre  
Tirée de Bouloc (2006, p. 48)

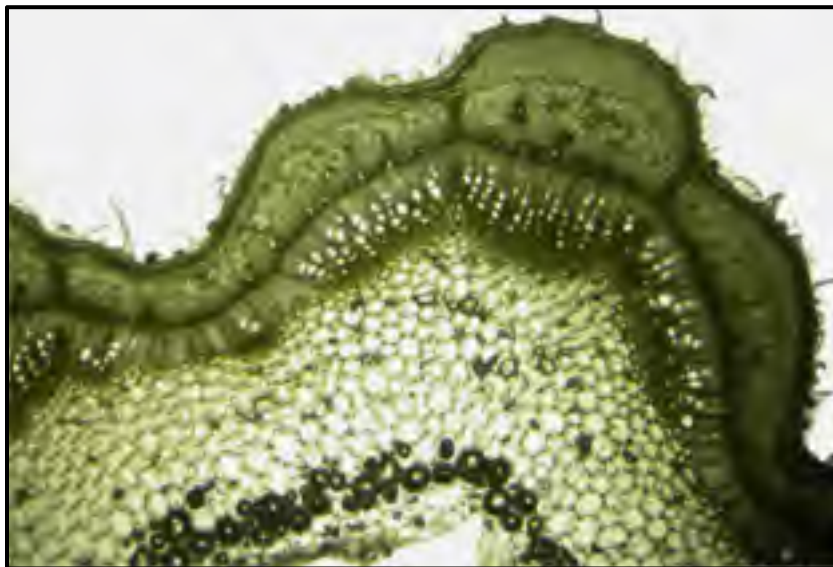


Figure 1.13 Coupe transversale d'une tige de chanvre  
Tirée de Mosiniak (2005)

Les fibres primaires et les fibres secondaires étant prélevées en deux endroits différents de la tige, comme le montre la figure 1.12, elles ont des caractéristiques différentes. Les fibres primaires ont des dimensions (longueurs et diamètres) plus importantes que les fibres secondaires. Elles possèdent une paroi très épaisse, une composition chimique particulière et une longueur plus grande que les fibres secondaires (Boulloc, 2006). Elles possèdent également de meilleures propriétés mécaniques (Beckermann, 2007). Le pourcentage de fibres libériennes pouvant être extraites de la tige de chanvre varie entre 28% et 46% (Bismarck et al., 2005).

Le chanvre étant une fibre libérienne, l'extraction de celle-ci, se fait en plusieurs étapes, qui sont le rouissage, la décortication et la fibrillation (Flandrin-Bletty, 1996). Le rouissage est le procédé traditionnel pour la production de fibres de chanvre. Il s'agit d'un processus naturel permettant d'obtenir des fibres de qualité variable en raison des différences de conditions météorologiques. Divers agents microbiens (bactéries, protozoaires et champignons) colonisent le chanvre et produisent des enzymes permettant la dégradation de polysaccharides. Une méthode plus contrôlable permet d'avoir des résultats moins dispersifs en qualité de fibres. Ce procédé consiste à tremper les tiges des plantes de chanvre dans de l'eau chaude (30-40°C) pendant une durée de 4 jours (Meijer et al., 1995).

Une fois, le rouissage entamé, la tige, ou ce qu'il en reste, est prêt pour l'étape de décortication, appelée aussi teillage. Ce procédé permet d'une part de séparer les fibres de la tige, et d'autre part de séparer les fibres entre elles, formant des faisceaux de fibres (Munder et al., 2005). Pour garder les propriétés des fibres intactes, la décortication se fait en plusieurs étapes : l'égrenage, l'étirage, le broyage et le battage.

Jusqu'à cette étape, les faisceaux de fibres de chanvre sont plus ou moins grossiers. Il ne reste donc plus qu'à obtenir des fibres élémentaires, c'est la fibrillation. Elle consiste à dégrader les liaisons entre les fibres élémentaires et à éliminer les parties résiduelles de la plante de chanvre. Plusieurs méthodes existent et permettent d'avoir des qualités de fibrillations variables. Les traitements à base de soude (Van Sumere, 1992) et les traitements

enzymatiques (Akin et al., 1997) ou par humidification (Van Sumere and Sharma 1991), permettent d'attaquer la lignine et les pectines se trouvant dans les lamelles mitoyennes. La fibre de chanvre est composée en très grande majorité de celluloses, ce qui lui permet d'avoir d'excellentes propriétés mécaniques. De plus, la composition chimique des fibres de chanvre va dépendre de l'âge, du lieu et des conditions météorologiques constatées pendant leur croissance. Le tableau 1.4 donne une plage de la composition chimique du chanvre.

Tableau 1.4 Plage de la composition de la fibre de chanvre  
Adapté de Placet et al. (2012), de Yan et al. (2016) et de Thygesen et al. (2001)

Composants	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Angle microfibrillaire (°)
Fraction massique	55 - 75	4 - 22	2 - 22	8	8 - 11

### 1.6.2 Le coco

Les fibres de coco sont extraites de la coquille extérieure (mésocarpe) des noix de coco, le fruit de la plante de coco (*Coco nucifera* L.) (figure 1.10). Cette plante est cultivée extensivement dans les pays tropicaux. La fibre de coco est une fibre cellulosique multicomposante avec un potentiel immense pour des applications commerciales profitables grâce à ses nombreuses propriétés utiles provenant de ses particularités structurales (Mahato et al., 1995).

Morphologiquement, la fibre de coco est multicellulaire, contenant entre 30 et 300 fibres élémentaires dans sa section transversale qui est polygonale, ronde ou elliptique (figure 1.14). Le diamètre de ces fibres élémentaire varie entre 12 et 14  $\mu\text{m}$  et celui de leur lumen entre 5 et 8  $\mu\text{m}$  (Satyanarayana et al., 1981). La surface de la cellule individuelle est lisse ou



rugueuse avec certains défauts. Le diamètre de la fibre de coco varie de 150 à 300  $\mu\text{m}$  et une variation de 20 à 60  $\mu\text{m}$  est observée pour le diamètre du lacuna (Tran et al., 2015).

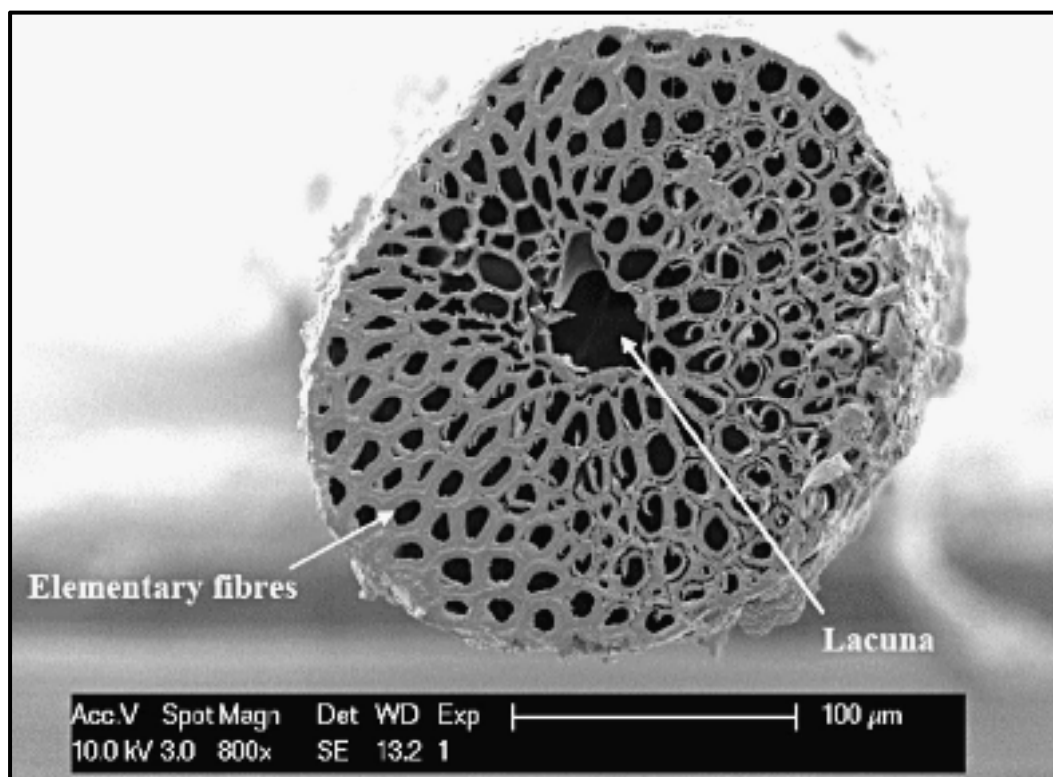


Figure 1.14 Coupe transversale d'une fibre de coco  
Tirée de Tran et Al. (2015, p. 439)

Tout comme le chanvre, le pourcentage des ingrédients dans la fibre de coco dépend l'âge de la noix et du lieu où elle a été cueillie. La cellulose et la lignine sont les constituantes principales de la fibre de coco, et sa haute teneur en lignine rend cette fibre plus rigide et plus dure. La plage de la composition chimique de la fibre de coco est donnée dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 Plage de la composition de la fibre de coco  
Adapté de Satyanarayana et al. (2007), de Yan et al. (2016), de Ayilimis et al. (2011) et de Akintayo et al. (2016)

Composants	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Angle microfibrillaire (°)
Fraction massique	36 – 44,5	0,15 – 0,5	40 – 45	1,8 - 4	30 - 45

Les fibres de coco, au vu de leurs propriétés, sont utilisées comme matériau dans les meubles, les planchers, les cordes, etc., mais elles sont également utilisées dans le contrôle de l'érosion, le renforcement et la stabilisation de sols. Au cours des dernières décennies, les recherches ont permis de montrer leur efficacité comme renforts dans les composites de polymères. Ces composites sont utilisés dans l'industrie automobile, la construction, les fournitures, les emballages et encore les isolations thermiques. Cependant, au vu de leur faible teneur en cellulose, de leur forte teneur en hémicellulose et de leur angle microfibrillaire élevé, leurs performances sont nettement plus faibles que d'autres fibres végétales comme le sisal, le chanvre, le lin ou le jute. (Satyanarayana et al., 1981).

## 1.7 Objectifs, hypothèses et retombées du projet

### 1.7.1 Objectifs du projet

Ce mémoire se décompose en deux objectifs principaux :

- Observation et vérification la morphologie des fibres de coco et de chanvre
- Modélisation des fibres élémentaires de coco et de chanvre pour effectuer des simulations selon différents critères

Cet objectif principal se décline en trois sous-objectifs de l'objectif principal, soit :

- O1 : Observation de fibres naturelles, que sont le chanvre, le coco et le sisal.
- O2 : Établissement d'un modèle simple et robuste.
- O3 : Construction d'un modèle numérique par éléments finis en considérant la forme réelle d'une fibre de coco et de chanvre, afin de prédire leurs propriétés mécaniques en statique.
- O4 : Validation des résultats obtenus avec les données expérimentales existantes.

### **1.7.2 Approche**

Pour répondre à l'objectif principal de l'étude, différents essais de coupe ont été effectués afin d'établir différents paramètres sur la morphologie de fibres végétales. La suite de l'étude se déroule en quatre grandes étapes.

Premièrement, une observation des fibres de coco et de chanvre a permis de confronter les observations effectuées lors de cette étude avec celles effectuées par d'autres chercheurs, d'une part. Et d'autre part, de faire ressortir différents paramètres comme le diamètre des deux fibres, puis d'émettre plusieurs critères, taille du lumen et épaisseur de la paroi sur les fibres élémentaires de coco et de chanvre (objectif O1).

Deuxièmement, un modèle simplifié a été créé afin de répondre au mieux aux critères émis et aux hypothèses du paragraphe 1.5.

Troisièmement, avec les paramètres obtenus grâce aux observations, une fibre de coco a été modélisée sur ANSYS pour déterminer les propriétés mécaniques de la fibre de coco modélisée (objectif O2).

Et dernièrement, les résultats obtenus grâce aux simulations ont été comparés avec une étude expérimentale d'essais en traction de la fibre de coco et de chanvre (Ho Thi T., 2008) (objectif O3).

### 1.7.3 Hypothèses de recherche

Dans le cadre de ce projet, de nombreuses simplifications ont été faites. Certaines d'entre elles ont plus d'influences que d'autres sur les propriétés élastiques de la fibre végétale. En effet, comme il est décrit dans le chapitre précédent, seules, la cellulose, la lignine et l'hémicellulose ont été prises en compte dans les caractéristiques mécaniques de la paroi des fibres élémentaires. Les autres composants ont en effet des propriétés élastiques négligeables devant ces trois-là, comme cela sera expliqué dans le chapitre 5. De plus, il existe une divergence entre les chercheurs pour les propriétés élastiques des composants principaux, ce qui implique un choix lors de la détermination des propriétés mécaniques de chacune des fibres de coco et de chanvre. Le choix de ces valeurs est expliqué dans la suite (chapitre 5) et sera le même pour les deux fibres.

D'autres hypothèses ont été faites afin de simplifier telles que :

- Seule la couche S2 sera prise en compte dans la caractérisation des propriétés mécaniques de la paroi des fibres élémentaires. Cette décision permet de limiter le choix arbitraire de la composition de la paroi primaire et des couches S1 et S3 de la paroi secondaire ;
- Les fibres végétales seront considérées comme étant droites, et non hélicoïdales.

### 1.7.4 Délimitations de l'étude

Bien que plusieurs paramètres, tels que ceux énumérés dans le paragraphe précédent viennent simplifier l'étude, le modèle ciblera les fibres élémentaires qui composent chacune des deux fibres végétales. Une approximation du module d'Young des fibres de coco et de chanvre sera faite suivant l'organisation des fibres élémentaires dans la fibre.

### **1.7.5 Retombées attendues et importance de l'étude**

Il est attendu de ce projet de maîtrise une meilleure compréhension de la morphologie de fibres de coco et de chanvre et une meilleure identification des variations du module d'Young des fibres de coco et de chanvre en fonction des caractéristiques. À la suite de cette étude, des modèles plus réalistes pourront être faits en se ciblant sur les caractéristiques importantes.



## **CHAPITRE 2**

### **EXPÉRIMENTATION POUR DÉTERMINATION DE LA MORPHOLOGIE DE LA FIBRE DE CHANVRE**

#### **2.1 Introduction**

Pour pouvoir effectuer une modélisation réaliste d'une fibre végétale, il est primordial de connaître la morphologie de celle-ci. Au vu des articles traitant de la connaissance morphologique, chimique et mécanique des fibres de chanvre (Placet et al., 2007) ou de coco (Tran et al., 2015), certaines sont plus simples à obtenir que d'autres. Les fibres de chanvre, au vu de leur taille, ont fait l'objet de diverses controverses. Pour certains, le diamètre externe des fibres de chanvre peut aller de 100  $\mu\text{m}$  à 200  $\mu\text{m}$ , comme décrit dans le chapitre 1, tandis que d'autres affirment que le diamètre des fibres de chanvre varie de 20  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$ . Cette différence serait due au fait que les premiers chercheurs étaient uniquement capables d'observer un amas de fibres. C'est pour cette raison qu'il est important d'avoir des observations fidèles de ces deux fibres, et en particulier celles provenant du chanvre, les fibres de coco étant plus simples à observer.

Cette partie permettra de détailler les différentes expérimentations faites pour obtenir une image précise de la morphologie de ces fibres végétales. Les expérimentations ont été menées avec des fibres de chanvre étant donné la complexité de celle-ci d'obtenir un visuel correct sur des coupes transversales. Le procédé de coupes sera expliqué dans les parties suivantes. Pour l'observation des coupes, un microscope à balayage électronique, de la marque Hitachi SU-8230, figure 2.1, sera utilisé pour l'obtention des images de chaque coupe des fibres observées.



Figure 2.1 Le microscope à balayage électronique  
Hitachi SU-8230

## 2.2 Coupe à l'aide du microtome

### 2.2.1 Caractéristique du microtome

Le microtome est un appareil de précision pour effectuer des coupes. Il permet de faire de fines tranches c'est-à-dire des coupes d'épaisseur variant entre 10  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ . Le choix de l'utilisation de cet appareil résidait dans sa capacité à faire des coupes avec un intervalle très fin. Cela permettrait, d'une part d'avoir un nombre d'échantillons suffisant pour construire une modélisation de la fibre, et d'autre part, de voir les variations des diamètres du lumen et du contour de la fibre sur la longueur.

Le microtome utilisé lors de cette recherche est le Leica RM2255 et la lame de coupe utilisée est une lame de carbure de tungstène pour sectionner sous cryostat avec LN21/Ln22, 30 mm, 40°.



### 2.2.2 Échantillon avec une résine de paraffine

Pour les premiers essais, une résine de paraffine est utilisée pour maintenir les fibres les plus droites possible afin de pouvoir faire des coupes perpendiculaires à la fibre neutre. L'échantillon de paraffine contenait plusieurs fibres de chanvre, réparties en trois endroits comme le montre la figure 2.2. Cette manœuvre permet d'augmenter le nombre de fibres de chanvre observées et donc d'avoir plus de chances d'obtenir des coupes successives.



Figure 2.2 Échantillon de paraffine contenant des fibres de chanvre

Avant de pouvoir commencer la coupe des fibres, l'échantillon a dû être calibré pour avoir des coupes nettes et transversales. Deux côtés successifs de l'échantillon ont été coupés à l'aide du microtome afin d'avoir des surfaces de référence. Cette étape permet d'effectuer des coupes transversales sur la longueur de la fibre de chanvre.

Suite à cette préparation, des coupes de différentes épaisseurs ont été effectuées, pour ne pas endommager la lame du microtome. Les premières coupes ont été faites avec une épaisseur de 10  $\mu\text{m}$ , qui correspond au minimum que ce modèle de microtome puisse faire, jusqu'à des avoirs des coupes ayant une épaisseur de 80  $\mu\text{m}$ .

Avant de commencer à augmenter l'épaisseur des coupes, les tranches de paraffines ont été examinées. Cependant, aucune partie des fibres de chanvre n'apparaît sur ces tranches. En pensant que la finesse des tranches permettrait aux fibres de se décoller et donc de tomber, des tranches plus épaisses ont donc été faites pour voir si les morceaux de fibre de chanvre resteraient dans la paraffine. Jusqu'à une épaisseur de 80  $\mu\text{m}$ , aucune des tranches ne possédait les fibres coupées. La figure 2.3 montre les coupes d'une épaisseur de 80 $\mu\text{m}$  de l'échantillon de paraffine au microtome. On remarque les trous positionnés à la place des fibres.



Figure 2.3 Coupe de l'échantillon à base de paraffine au microtome

À la suite de ce problème, il est important de comprendre pourquoi ces tranches de fibre de chanvre ne sont pas coupées et n'apparaissent pas dans la paraffine. Suite à l'observation de l'échantillon après la coupe, les fibres de chanvre dépassent de la résine de paraffine, et ceci pour n'importe quelle épaisseur des tranches. Cela signifierait que les fibres se plient sous le contact de la lame.

Ainsi, au contact de la lame de microtome et des fibres de chanvre, l'effort qui est exercé par la lame était probablement supérieur à l'effort que la paraffine produit sur la fibre de chanvre. La paraffine n'étant pas assez dense pour maintenir les fibres de chanvre lors du contact de la lame, celles-ci vont se tordre au contact de la lame, et non se couper. Au vu de ces résultats avec la paraffine, une résine plus dense doit être utilisée afin d'empêcher le déplacement de la fibre de chanvre sous l'effet de la lame du microtome.

### **2.2.3 Échantillon avec une résine de polyester**

Pour remédier à ce problème, une nouvelle résine plus dure que la paraffine a été envisagée dans le but d'obtenir ces coupes transversales de la fibre de chanvre. Cependant, cette nouvelle résine doit avoir des propriétés mécaniques permettant le maintien de la fibre lors de la coupe, mais être suffisamment « molle » pour être coupée par la lame argentée. Au vu de ces caractéristiques, une résine d'époxy pourrait permettre la découpe de la fibre de chanvre sans endommager la lame argentée et risquer de la briser. Ainsi, à la suite d'une discussion avec les fournisseurs de l'ÉTS, la résine de polyester : WC-575 A/B, dont les caractéristiques sont en annexe I, répondrait aux besoins pour cette recherche.

#### **2.2.3.1 Méthode de préparation de la résine de polyester**

Sous les conseils de l'entreprise BMB, fournisseur de cette résine, diverses étapes ont été nécessaires afin d'optimiser les caractéristiques de notre échantillon. Ces étapes préparatoires sont les suivantes :

- Les fibres de chanvre ont été mises dans une étuve à 40°, durant les 24h avant la coulée de la résine ;

- Suivant la fiche technique de la résine de polyester, pour 100g de la solution A, 90g de la solution B, le durcisseur a été ajouté ;
- La résine a été dégazée. Pour cela, elle a été dégazée à vide pendant 2 à 3min avant de couler la résine sur les fibres ;
- Le durcissement de la résine de polyester a duré 5 jours à 25° ;
- Pour un meilleur résultat, l'échantillon a été mis sous pression, entre 60 et 80 Psi, dans un pot de pression pendant la durée du durcissement.

Une fois ces préparatifs faits, les échantillons de polyester contenant trois amas de fibres de chanvre sont obtenus. La figure 2.4 montre un échantillon.



Figure 2.4 Échantillon de polyester contenant les fibres de chanvre

#### 2.2.3.2 Découpe des échantillons enrobés avec la résine de polyester

Comme pour les échantillons de paraffine, des faces de référence à l'aide du microtome ont été faites avant d'entamer la coupe transversale à la longueur des fibres de chanvre. Les coupes ont commencé avec la capacité minimale du microtome, soit 10  $\mu\text{m}$ . Obtenant le même résultat qu'avec la paraffine, l'épaisseur des tranches a donc été augmentée jusqu'à la

limite de microtome. À partir de 20  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, la lame du microtome n'exerçait plus des coupes linéaires sur la résine de polyester.

Les fibres de chanvre ne sont toujours pas dans les tranches. À la suite de ce nouvel échec, une hypothèse est faite. Bien que cette nouvelle résine soit plus rigide que la paraffine, la faible épaisseur des coupes ne permettrait pas de les maintenir et, par le mouvement de la lame, provoquerait un décollement des fibres de la résine polyester.

### **2.2.3.3 Découpe des échantillons faits avec la résine de polyester sous azote liquide.**

Après cet échec, l'utilisation de l'azote liquide pourrait maintenir le chanvre et la résine de polyester ensemble. L'échantillon ainsi que la lame ont été placés à une température de  $-150^{\circ}\text{C}$ . Une fois à cette température, de nouvelles coupes réalisées. La figure 2.5 montre une coupe obtenue sous l'azote liquide. Malheureusement, même en utilisant l'azote liquide, les résultats obtenus restent identiques aux deux essais précédents. Bien que les fibres de chanvre aient pu être coupées avec la résine cette fois-ci. Pourtant ces fibres coupées ne restaient pas figées dans les tranches de polyester. Ainsi, la seule chose observable était la présence de trous à l'endroit où se situaient les fibres.



Figure 2.5 Coupe de l'échantillon sous azote liquide

À la suite de ces résultats, il est préférable de trouver une autre façon d'effectuer ces coupes. Le problème de cet appareil est sa sensibilité. En effet, le microtome utilisé ne peut couper que des échantillons ayant une rigidité suffisamment faible pour que la lame ne soit pas endommagée. Et cette rigidité n'est pas suffisante pour couper et maintenir les fibres de chanvre en place.

## **2.3 Coupe à l'aide d'un simple couteau à lame rétractable**

Au vu des résultats précédents, cette étape a permis d'avoir une image au MEB de la fibre de chanvre. Le but étant de déterminer la plage des dimensions d'une fibre de chanvre, pour adapter une nouvelle méthode de découpe.

### **2.3.1 Procédé pour l'observation de la fibre de chanvre**

La méthodologie utilisée dans ce cas a été de métalliser la fibre directement. Pour observer ces fibres au MEB, plusieurs amas de chanvre ont été placés sur des pastilles, comme le montre la figure 2.6. Ensuite, une coupe à l'aide d'un couteau à lame rétractable a été appliquée à chacun des amas de chanvre. Puis, à cette entaille, les amas de chanvre ont été redressés afin de pouvoir observer l'intérieur des fibres de chanvre.



Figure 2.6 Échantillons de plusieurs amas de chanvre placés sur des pastilles

### 2.3.2 Résultats obtenus à l'aide du MEB

Une fois que les échantillons ont été mis en place et après avoir métallisé la surface en déposant un film de 20 nm d'or, des observations de quelques fibres ont pu être faites. Sur ces observations, le lumen était visible (figure 2.7).

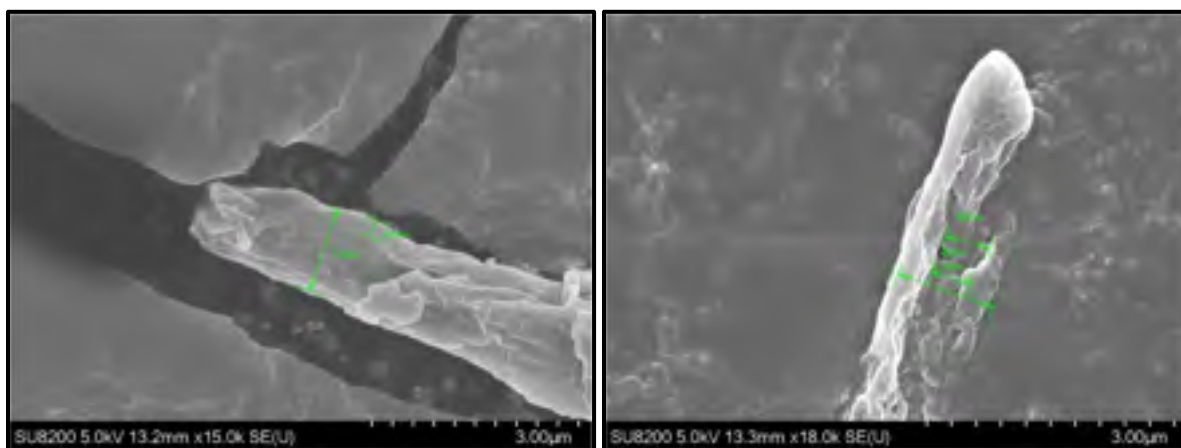


Figure 2.7 Observations de fibres de chanvres coupées à l'aide d'un couteau à lame rétractable

Ces résultats ne sont pas assez concluants pour que ce procédé soit utilisé pour connaître les dimensions des fibres. En effet, on remarque bien les deux parties de la fibre de chanvre : son lumen et sa paroi, on remarque aussi que la section varie suivant la longueur de la fibre. Cependant, la forme de la section transversale de la fibre ne peut être déduite. On ne peut savoir si la section est elliptique ou circulaire. Une remarque a pu être faite sur les dimensions des fibres. Faute d'avoir des coupes franches, les dimensions des fibres de chanvre observées sont nettement plus faibles que celles obtenus par d'autres chercheurs. Les fibres observées ont des dimensions de quelques micromètres avec une épaisseur d'une centaine de nanomètres. Ces résultats diffèrent par rapport à ceux énumérés dans le chapitre 1 et devront donc être confirmés par la suite.

## **2.4 Coupe à l'aide d'une scie diamantée**

Bien que la coupe au couteau à lame rétractable ait donné des observations exploitables, l'évolution de la morphologie sur la longueur de la fibre de chanvre ne pouvait pas être obtenue. Pour l'observation de l'évolution de la morphologie de la fibre, plusieurs coupes sur la longueur étaient nécessaires. Pour cela, une résine d'époxy a été utilisée. Cependant, au vu de ces caractéristiques, le microtome ne pouvait être utilisé, puisqu'il y avait un risque de détériorer la lame. Un Precision Cutter avec une scie diamantée a été utilisé pour effectuer les coupes des échantillons d'époxy (figure 2.8).



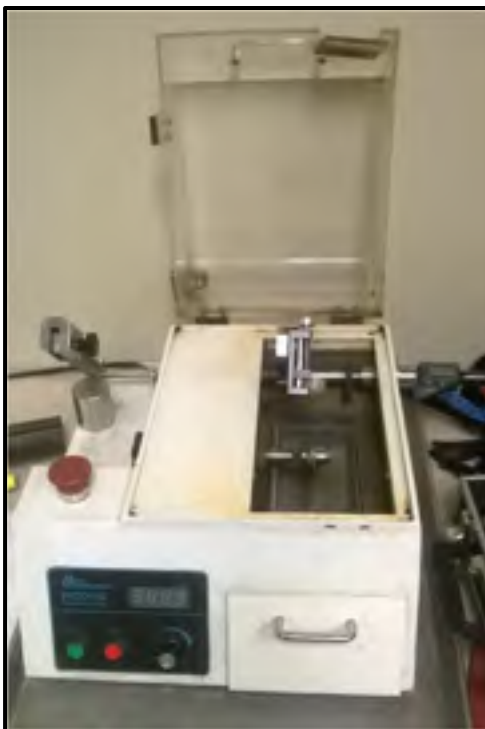


Figure 2.8 Precision Cutter avec une scie diamantée

#### 2.4.1 Échantillon avec une résine d'Époxy

Les résultats précédents montrant que les résines utilisées n'étaient pas suffisamment denses pour maintenir la fibre de chanvre lors de la coupe, une résine ayant de meilleures propriétés mécaniques doit être utilisée. Suite à des confrontations sur les différentes résines pouvant respecter les critères, la résine d'époxy EL-319 a été utilisée.

#### Méthode de préparation de la résine d'Époxy EL-319

Pour ces échantillons, la résine d'Époxy EL-319 a donc été utilisée. Pour le mélange de l'échantillon, c'est 80% de la résine EL-319, en volume, et 20% du durcissant, en volume. Ensuite, la résine d'Époxy a été versée dans un moule contenant les fibres de chanvre qui ont été mises dans un four à 30° pendant 24h avant le moulage. Une fois la résine versée dans le moule, une période de 10h est nécessaire avant toute expérimentation.

#### **2.4.2 Observation de ces échantillons au MEB**

Une coupe tous les 2 mm a été effectuée afin de voir la morphologie d'une coupe transversale de la fibre de chanvre. Puis, grâce au MEB, une image des fibres de chanvre a donc été observée. Cette observation a confirmé ce que les fibres de chanvre ont une épaisseur de couche et une morphologie non constantes.

Comme vu dans la littérature, le résultat obtenu est similaire à celui observé par d'autres chercheurs, comme ceux donnés par Mme Hô Thi (2008). De plus, la scie diamantée qui applique une force sur la fibre de chanvre a engendré une déformation sur celle-ci qui entraîne une modification de la morphologie de celle-ci (figure 2.9a), ce qui ne permet pas de distinguer correctement les différentes fibres ainsi que le lumen. Et même si des cavités sont visibles sur ces observations, aucune certitude ne peut être faite pour savoir si elles correspondent au lumen ou simplement à l'espace entre deux fibres élémentaires. En effet, les dimensions de celle-ci et celles observées dans la partie précédente sont très différentes. De plus, une déformation a été observée : cette déformation est due à effort vertical qui a été appliqué à la fibre pour qu'elle soit coupée. Cet effort va forcer la fibre à se déplacer vers le haut, ce qui engendre un recouvrement possible du lumen (figure 2.9b).

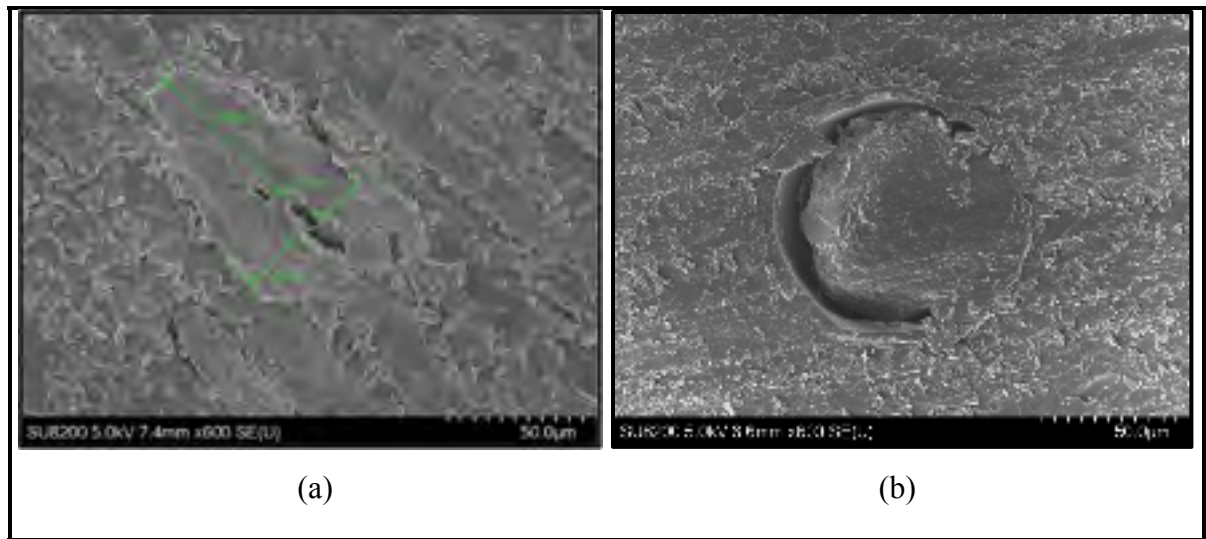


Figure 2.9 Coupe transversale d'une fibre de chanvre gelée dans la résine d'époxy

## 2.5 Bilan des découpes faites à l'aide d'une lame

Le bilan qui peut être tiré de ces expérimentations, est que la découpe de fibres de chanvre est d'une complexité telle, qu'à chaque coupe, une déformation de la morphologie est faite par la lame utilisée et donc les observations sont inexploitable. Que ce soit à l'aide d'une lame ou d'une scie, aucun des résultats obtenus ne peut être satisfaisant et ne permet d'avoir une bonne représentation de la fibre de chanvre. Ainsi, pour résoudre ce problème, il faut trouver un moyen pour obtenir des coupes transversales sans appliquer d'effort sur la fibre de chanvre avec la lame.

## 2.6 Expérimentations avec une méthodologie non destructive

### 2.6.1 Observation par les rayons X

Suite à cette conclusion, une méthodologie non destructive a donc été cherchée pour pouvoir connaître la morphologie de la fibre de chanvre. Selon, certains chercheurs, les fibres de chanvre ont pu être observées à l'aide d'un micro-CT scan. Ce procédé consiste en un scan

tomographique par les rayons X. Il permet d'avoir une image en 3D de la fibre de chanvre, et donc de déterminer ses diamètres internes et externes.

Cependant, après plusieurs essais, aucune observation n'a pu être faite. Le problème de ce procédé est que la fibre de chanvre a des dimensions et une densité trop faible. Le micro-CT scan ne pouvant détecter la fibre de chanvre, ce procédé est obsolète.

### 2.6.2 Coupe à l'aide d'un laser

Au vu de ces conclusions, plusieurs hypothèses ont été émises pour savoir si des expérimentations non traitées pourraient faire en sorte d'obtenir le résultat voulu. La seule qui semblait cohérente était la coupe au laser. En effet, grâce à ce procédé, une coupe pouvait être effectuée sans que la fibre de chanvre subisse un effort pouvant la déformer.

Après avoir exercé ce procédé sur une fibre de chanvre, la morphologie de celle-ci a pu être observée au MEB. La figure 2.10 montre cette observation. Le constat qui a été fait est que, d'une part, chacune des fibres de chanvre peut être distinguée, et d'autre part, la distinction du lumen et de la paroi est visible.

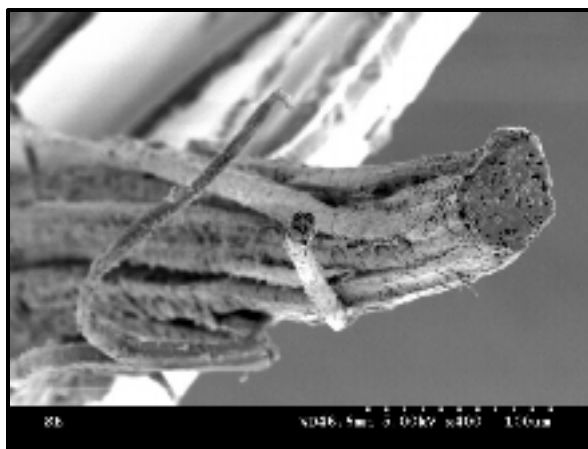


Figure 2.10 Morphologie d'une fibre de chanvre suite à une coupe au laser

## **CHAPITRE 3**

### **OBSERVATION ET INTERPRÉTATION DES COUPES DE CHACUNE DES FIBRES VÉGÉTALES**

#### **3.1 Introduction**

Pour chacune des fibres présentées dans les paragraphes 1.6.1 et 1.6.2 du chapitre 1, plusieurs observations ont été effectuées. Cela m'a permis dans un premier temps, de comparer les fibres avec celles de la revue de littérature ; la morphologie des fibres variant selon les régions où elles sont cultivées, comme l'explique Liu M. (2015). Ainsi, il est important de bien connaître les dimensions des fibres de coco et de chanvre pour pouvoir comparer les résultats obtenus, puisque la méthode d'extraction, leur maturité, et l'endroit où elles ont été cultivées vont interagir, à la fois sur la composition chimique et sur la morphologie, ce qui provoquera un impact sur le module d'Young. Et dans un second temps, d'effectuer différentes mesures pour établir un modèle numérique qui est le plus proche de la réalité.

Dans ce mémoire, seule la morphologie des coupes transversales à la longueur de chacune des fibres sera détaillée. Plusieurs points seront abordés lors de ces interprétations, comme :

- La forme de la section transversale de la fibre : est-elle de forme elliptique ou de forme circulaire ;
- L'épaisseur de la paroi ;
- Le rapport entre le diamètre externe des fibres élémentaires et celui du lumen.

Toutes ces hypothèses énumérées doivent maintenant être observées. De plus, lors de ce chapitre, une attention particulière sera faite aux fibres élémentaires présentes dans les fibres de coco et de chanvre, puisque les modules numériques, présentés dans le chapitre 5, seront établis sur les différences entre les fibres élémentaires.

Au vu du chapitre précédent, la seule méthode exécutée lors des essais qui limite les effets de la coupe, déformation, écrasement ou déchirement, sur les fibres est celle qui nécessite l'utilisation du laser, dont le programme qui a permis de réaliser les diverses coupes est présenté en annexe II. Comme vu dans le chapitre précédent, grâce à cette méthode, les fibres ont pu conserver dans leur ensemble leur morphologie naturelle.

Pour observer ces phénomènes, plusieurs coupes au laser ont été réalisées sur une même fibre. Chacune des fibres a été coupée sur une longueur de 10 mm, avec une coupe tous les 2 mm, soit 6 coupes par fibre. Ces dimensions ont été prises par rapport à divers essais en traction des fibres de coco et de chanvre (Ho Thi, 2008 et Sefriouimanar, 2014) et les coupes internes ont été faites de façon à être manipulées sans risque de créer des déformations sur les coupes qui seront observées. Avant l'examen par SEM, les échantillons ont été recouverts par une couche d'or de 20 nm, grâce à l'utilisation d'un appareil à pulvérisation de plasma.

## **3.2 Observation de la fibre de Coco**

### **3.2.1 Introduction**

Au vu des différentes coupes observées dans les revues et thèses scientifiques, les fibres de coco ont la particularité d'avoir une morphologie similaire selon les régions où elles sont extraites. Dans le but de valider les hypothèses émises lors des simulations numériques les propriétés élastiques des fibres de coco, la connaissance de la morphologie sont donc nécessaires.

Lors des modélisations qui seront effectuées, le choix de cette étude est de porter une grande attention aux fibres élémentaires. Comme décrit dans le chapitre 1, la fibre de coco est composée de plusieurs fibres élémentaires collées les unes aux autres. Dans le but d'obtenir des résultats se rapprochant le plus possible de la réalité, il semble préférable de faire une modélisation sur une fibre élémentaire de coco, puis, de les regrouper pour former une partie de la fibre de coco, que de modéliser directement la fibre de coco, au risque d'émettre un grand nombres d'hypothèses.

Le but de cette partie est de pouvoir établir des paramètres, comme ceux cités précédemment pour, d'une part retrouver des similitudes avec d'autres chercheurs et, d'autre part, créer un modèle numérique qui soit le plus proche de la réalité. Pour cela, une quinzaine de fibres de coco a été observée. Lors des différentes observations, la plupart des coupes faites sur les fibres de coco ont été réussies. La figure 3.1 montre les six coupes d'une même fibre de coco, espacées de 2 mm. On peut remarquer les variances sur la morphologie entre les coupes, que ce soit sur le nombre de fibres élémentaires, ou sur les dimensions externes de la fibre.

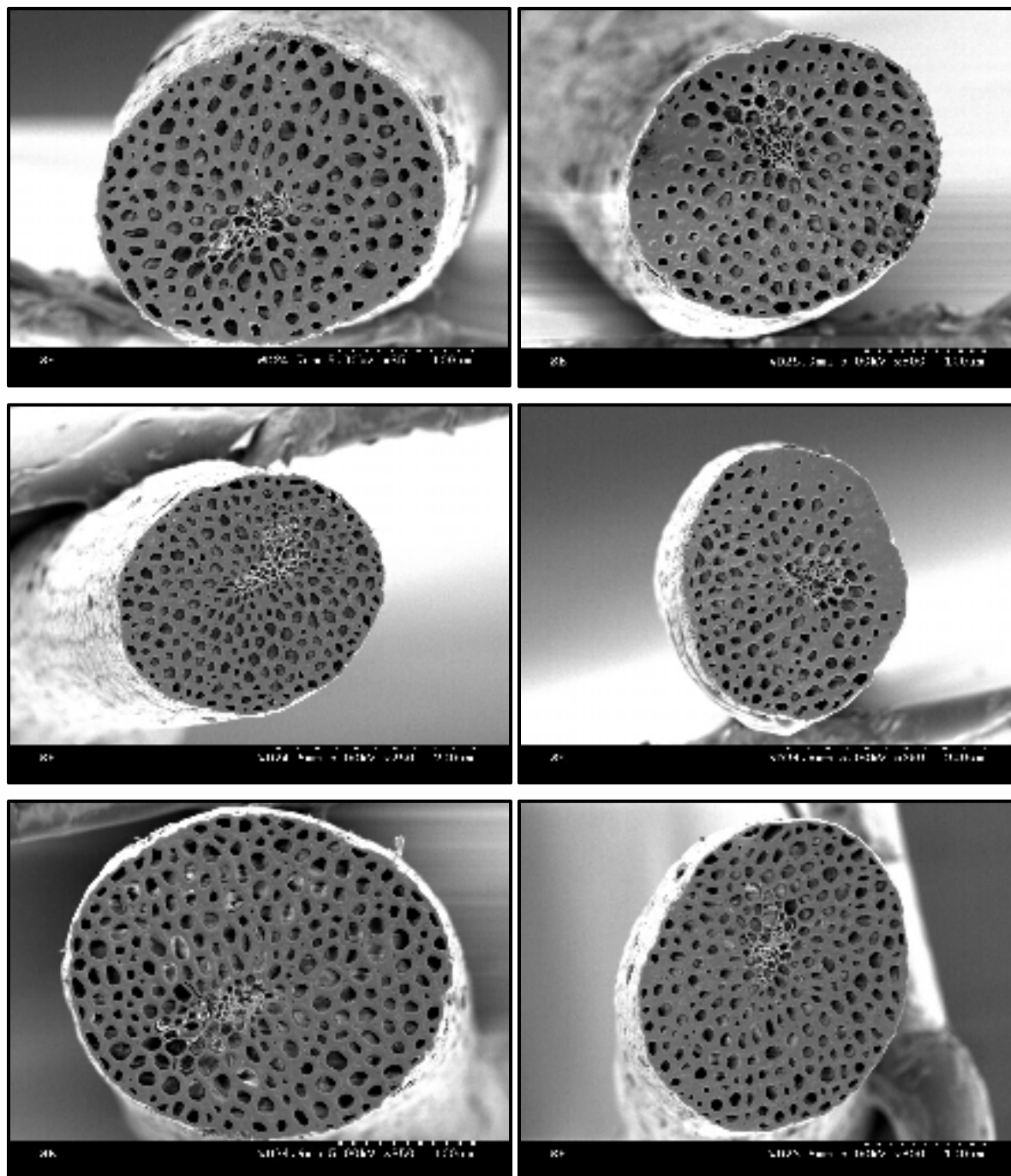


Figure 3.1 : Six coupes d'une même fibre de coco



### 3.2.2 Interprétation

Dans le but de connaître les caractéristiques de la fibre de coco et de créer un modèle comparable aux résultats expérimentaux obtenus par des chercheurs, il est important de se baser sur des fibres qui seront les plus similaires possible. C'est pour cela, que différentes mesures ont été faites sur plusieurs fibres de coco, afin d'obtenir une moyenne de celles-ci et de voir les différences ou les similitudes avec d'autres études. Les tableaux 3.1 et 3.2 reprennent les caractéristiques de la fibre de coco c'est à dire le diamètre externe et le diamètre du lacuna. Au vu des observations, la section la plus courante qui est observée sur les fibres de coco est elliptique. De ce fait, pour chacune des coupes, deux mesures ont été prises : le diamètre « D », qui correspond au plus grand diamètre de l'ellipse et le diamètre « d » qui correspond au plus petit.

Après analyse, une variation de la fibre suivant sa longueur est visible. En effet, sur la totalité des observations, le diamètre « D » de la fibre de coco a une variation de 94,0 à 270  $\mu\text{m}$ , avec une valeur moyenne de  $155 \pm 115 \mu\text{m}$ . Le diamètre « d » a une variation de 79,1 à 224  $\mu\text{m}$ , avec une valeur moyenne de  $134 \pm 89,9 \mu\text{m}$ . Pour avoir une représentation de l'ellipse, le rapport de D/d a été calculé et la moyenne obtenue est de  $1,17 \pm 0,57 \mu\text{m}$ .

Suite à l'analyse de la section externe, une analyse similaire du lacuna a été faite. En effet, la section de lacuna étant elliptique, la même analyse a été faite. Ainsi, sur la totalité des observations, le diamètre « D » de la fibre de coco a une variation de 10,7 à 38,7  $\mu\text{m}$ , avec une valeur moyenne de  $21,4 \pm 17,3 \mu\text{m}$ . Le diamètre « d » a une variation de 4,71 à 22,0  $\mu\text{m}$ , avec une valeur moyenne de  $13,4 \pm 8,69 \mu\text{m}$ . Pour avoir une représentation de l'ellipse, le rapport de D/d a été calculé et la moyenne obtenue est de  $1,58 \pm 2,30 \mu\text{m}$ .

Tableau 3.1 Diamètre externe des fibres de coco observées

	Coupe 1		Coupe 2		Coupe 3		Coupe 4		Coupe 5		Coupe 6		Moyenne	
	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )
Fibre 1	161,7	134,2	160,1	121,4	141,1	123,5	145,9	125,4	142,1	133,9	127,5	120,7	146,4	126,5
Fibre 2	179,0	170,3	180,6	177,3	173,7	160,7	174,1	154,4	175,8	154,3	169,2	159,1	175,4	162,7
Fibre 3	185,5	163,8	180,6	131,3	172,7	155,5	195,5	163,2	201,7	172,3	197,9	159,5	189,0	157,6
Fibre 4	148,2	139,0	150,5	125,9	147,4	139,1	179,0	138,5	141,2	139,5	167,5	145,4	155,6	137,9
Fibre 5	149,5	136,8	149,1	137,9	125,7	113,7	133,6	113,4	131,7	113,4	109,6	121,7	133,2	122,8
Fibre 6	242,4	163,6	227,7	130,6	189,7	152,3	227,2	157,4	207,6	134,2	171,9	117,7	211,1	142,6
Fibre 7	94,8	69,4	85,5	75,8	88,4	81,3	102,1	83,8	96,4	80,6	96,6	83,7	94,0	79,1
Fibre 8	144,8	143,4	155,7	149,5	166,3	149,1	153,9	146,0	153,1	138,4	148,7	136,1	153,8	143,8
Fibre 9	137,8	121,0	137,0	107,5	134,9	117,7	135,1	113,4	144,4	128,2	130,9	106,9	136,7	115,8
Fibre 10	272,5	230,4	277,5	224,3	252,7	213,2	278,8	236,4	/	/	271,5	218,0	270,6	224,5

Tableau 3.2 Diamètre du lacuna des fibres de coco

	Coupe 1		Coupe 2		Coupe 3		Coupe 4		Coupe 5		Coupe 6		Moyenne	
	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )
Fibre 1	29,50	22,31	30,53	21,28	29,54	24,56	36,13	18,58	37,21	20,01	18,76	17,13	30,28	20,65
Fibre 2	22,72	15,72	21,72	11,92	28,95	15,66	29,46	15,24	27,89	19,68	22,89	22,32	25,61	16,76
Fibre 3	33,83	16,37	36,84	16,69	22,23	16,84	34,03	24,56	34,18	32,81	42,54	24,39	33,94	21,94
Fibre 4	17,76	8,35	14,98	13,27	14,01	9,205	24,86	14,57	18,38	11,51	23,65	17,84	18,94	12,46
Fibre 5	17,56	16,59	20,35	17,44	14,96	7,56	13,89	10,29	13,38	10,12	/	/	16,03	12,4
Fibre 6	26,84	11,82	20,31	/	20,27	18,42	22,57	14,68	15,97	13,62	17,15	9,35	20,52	13,58
Fibre 7	16,26	6,7	12,92	10,18	13,94	12,46	/	/	10,86	6,08	18,01	4,65	14,40	8,01
Fibre 8	20,17	19,16	18,10	9,67	19,21	18,90	27,37	14,91	19,85	19,67	28,2	17,88	22,15	16,70
Fibre 9	20,62	15,53	18,92	18,73	19,25	13,32	12,14	11,46	21,56	14,32	/	/	18,5	14,67
Fibre 10	40,07	28,08	36,39	21,86	50,92	22,23	38,20	19,20	/	/	27,89	15,42	38,69	21,36

Cependant, lors de cette étude, les modèles qui seront effectués ne porteront pas sur la fibre de coco, mais sur les fibres élémentaires. Il est donc judicieux d'établir plusieurs paramètres qui seront utilisés pour la modélisation. L'un des premiers paramètres sera de connaître la forme des fibres élémentaires. Il faut en effet se demander si la fibre élémentaire est de forme circulaire, elliptique, polygonale, ou rectangulaire, comme la fibre de bois (Persson, 2000), qui est la fibre de référence au vu des nombreuses études dont elle a fait l'objet. Les autres paramètres porteront sur le diamètre de lumen et sur l'épaisseur de la paroi de la fibre élémentaire. Le tableau 3.3 permet de voir le nombre de fibres élémentaires sur chacune des coupes. Ce nombre de fibres élémentaires varie. La fibre de coco peut contenir de 65 à 224 fibres élémentaires, ce qui correspond aux affirmations de Mme Ho Thi (2008), qui estimait le nombre de 30 à 300.

Tableau 3.3 Nombre de fibres élémentaires pour chacune des coupes de la fibre de coco

	coupe 1	coupe 2	coupe 3	coupe 4	coupe 5	coupe 6	moyenne
fibre 1	118	110	108	112	121	107	112,7
fibre 2	131	137	123	124	126	123	127,3
fibre 3	155	/	123	166	158	149	150,2
fibre 4	92	86	97	117	97	92	96,8
fibre 5	98	101	77	73	78	65	82,0
fibre 6	156	106	101	123	96	77	109,8
fibre 7	115	118	121	103	105	/	11,4
fibre 8	73	91	91	96	82	95	88,0
fibre 9	100	97	102	99	102	89	98,2
fibre 10	192	181	196	213	224	231	206,2

Du fait que ce nombre de fibres élémentaires varie le long de la fibre de coco, il est important de se concentrer sur ces fibres élémentaires. En effet, la fibre de coco étant une fibre multicellulaire, ce sont les propriétés mécaniques des fibres élémentaires qui donneront les propriétés mécaniques de la fibre de coco.

Dans ce but, la morphologie des fibres élémentaires sera étudiée. Les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6 montrent, respectivement, les valeurs minimales et maximales des diamètres du lumen des fibres élémentaires observées sur les 10 fibres coupées, ainsi que les valeurs de l'épaisseur de leur paroi. Ces valeurs permettent d'avoir une plage des dimensions de la fibre élémentaire de coco pour connaître le module d'Young d'une fibre élémentaire moyennée, et ensuite voir l'influence de ces dimensions sur le module d'Young. Le lumen, ayant une section elliptique, il a une variation de  $1,78 \mu\text{m}$  à  $11,04 \mu\text{m}$ , avec une moyenne de  $8,49 \pm 6,71 \mu\text{m}$  pour le diamètre « D » et de  $1,16 \mu\text{m}$  à  $8,06 \mu\text{m}$ , avec une moyenne de  $6,98 \pm 5,82 \mu\text{m}$  pour le diamètre « d », avec une épaisseur qui varie de  $1,83 \mu\text{m}$  à  $4,40 \mu\text{m}$ , avec une moyenne de  $3,23 \pm 1,4 \mu\text{m}$ . De plus, sur la figure 3.2, montrant un zoom sur des fibre de coco, il est possible de voir des fibres élémentaires et de constater que l'épaisseur de la paroi des fibres élémentaires est constante le long de la section, ce qui signifie que la forme de la section du lumen suit celle de sa paroi. Parallèlement, les valeurs données dans le tableau 3.6, montrent que l'épaisseur de la paroi, pour les fibres élémentaires de coco est quasiment identique, quelle que soit la taille de la fibre élémentaire.

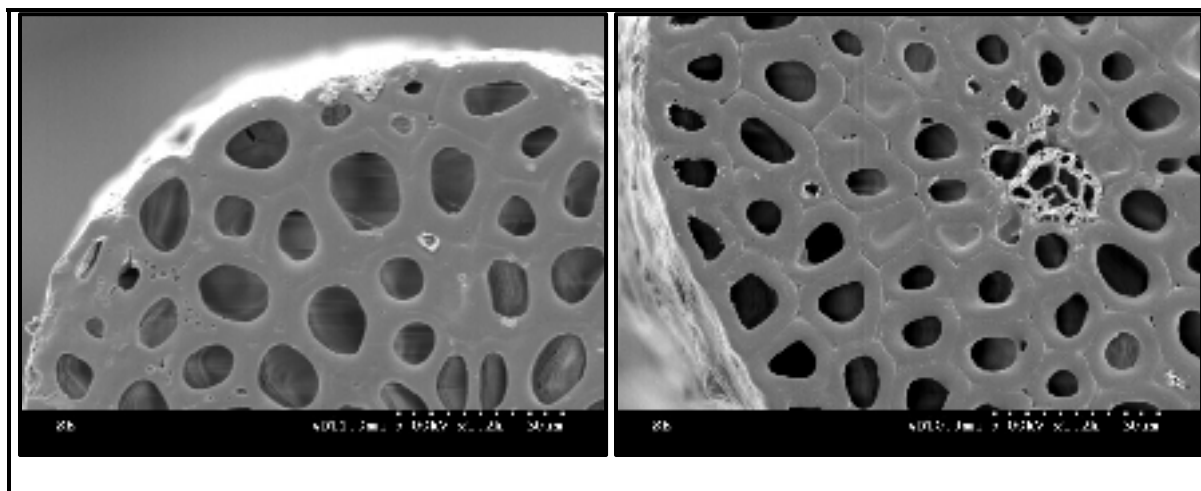


Figure 3.2 Zoom sur des fibres de coco

Tableau 3.4 Diamètres du lumen des plus grandes fibres élémentaires

	Coupe 1		Coupe 2		Coupe 3		Coupe 4		Coupe 5		Coupe 6		Moyenne	
	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )
Fibre 1	12,66	11,44	11,69	10,42	12,21	8,17	11,8	8,27	12,31	8,79	10,65	7,1	11,89	9,03
Fibre 2	17,65	8,95	14,46	11,43	12,91	9,94	14,74	11,93	14,71	8,65	14,71	11,34	14,86	10,37
Fibre 3	15,29	10,55	11,04	9,65	11,89	9,68	11,69	8,28	12,68	11,24	12,33	8,38	12,49	9,63
Fibre 4	13,65	7,5	11,83	8,18	12,91	6,23	12,11	8,81	12,11	8,31	11,89	8,18	12,42	7,87
Fibre 5	14,17	8,39	13,9	8,34	11,45	9,14	12,66	10,32	11,2	8,81	13,5	12,31	12,81	9,55
Fibre 6	17,17	9,63	16,36	10,7	17,11	11,44	20,09	17,15	13,77	12,91	14,03	11,24	16,42	12,18
Fibre 7	11,23	9,45	14,66	11,79	13,36	11	13,16	10,88	15,01	11,79	17,26	9,27	14,11	10,7
Fibre 8	10,72	13,1	10,41	13,5	12,89	15,02	14,63	16,58	11,95	14,33	9,1	11,7	11,62	14,04
Fibre 9	9,41	10,59	7,14	8,74	9,27	10,75	9,91	11,03	9,2	14,65	8,19	13,78	8,85	11,59
Fibre 10	11,52	15,25	12,33	20,59	11,41	15,89	13,44	14,44	14,31	16,15	12,17	17,67	12,53	16,67

Tableau 3.5 Diamètres du lumen des plus petites fibres élémentaires observées

	Coupe 1		Coupe 2		Coupe 3		Coupe 4		Coupe 5		Coupe 6		Moyenne	
	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )
Fibre 1	3,29	1,16	2,21	2,10	1,98	1,16	1,78	1,69	2,50	1,76	3,04	1,89	2,47	1,62
Fibre 2	4,19	2,61	3,31	2,43	3,97	8,06	5,26	3,98	2,87	2,21	3,28	2,51	3,81	3,63
Fibre 3	1,82	1,56	11,04	3,65	2,54	2,07	3,38	1,87	4,72	4,10	4,41	2,65	4,65	2,65
Fibre 4	4,96	3,54	3,97	2,22	4,35	3,89	5,07	3,03	2,46	1,88	1,87	1,16	3,78	2,62
Fibre 5	3,65	3,02	4,65	1,59	3,30	3,20	3,18	1,98	2,22	1,71	3,66	2,95	3,44	2,41
Fibre 6	4,24	2,67	4,34	3,49	5,87	3,98	7,46	2,32	5,96	4,23	3,45	3,32	5,22	3,33
Fibre 7	3,81	1,71	4,41	2,58	4,45	3,33	3,65	3,26	5,68	3,37	5,53	4,58	4,59	3,14
Fibre 8	3,55	2,25	3,26	1,88	5,79	4,12	4,65	2,58	4,72	3,18	3,81	2,93	4,29	2,82
Fibre 9	3,05	2,57	4,98	3,14	23,70	2,37	4,76	3,04	4,82	2,12	2,93	2,58	7,37	2,64
Fibre 10	3,70	2,51	8,74	4,14	4,57	3,01	3,11	2,69	3,97	2,25	8,83	4,31	5,49	3,15

Tableau 3.6 Épaisseurs des fibres élémentaires présentées dans le tableau 4.4 (1)  
et dans le tableau 4.5 (2)

	Coupe 1		Coupe 2		Coupe 3		Coupe 4		Coupe 5		Coupe 6		Moyenne	
	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )	a ( $\mu\text{m}$ )	b ( $\mu\text{m}$ )
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Fibre 1	3,31	3,21	2,25	3,72	3,28	3,75	4,40	3,39	3,35	3,65	2,85	2,93	2,89	3,31
Fibre 2	3,41	3,57	2,46	4,12	2,27	4,19	2,97	4,19	3,49	2,87	3,79	3,07	3,91	3,41
Fibre 3	3,21	3,70	2,69	3,67	3,71	3,37	1,83	4,09	3,20	3,18	2,22	3,28	3,54	3,21
Fibre 4	3,37	3,21	3,79	3,59	4,25	3,71	3,41	2,76	2,25	4,22	2,22	3,97	3,10	3,37
Fibre 5	2,99	2,31	2,58	2,61	3,37	2,51	3,20	3,10	3,55	3,18	3,26	3,14	3,08	2,99
Fibre 6	3,28	4,09	3,00	3,42	2,88	3,44	2,79	2,83	2,98	3,32	3,97	3,52	3,12	3,28
Fibre 7	3,24	3,48	3,81	3,58	3,37	2,81	3,63	3,18	3,10	2,69	2,59	3,77	2,86	3,24
Fibre 8	3,17	3,59	3,00	3,32	2,65	3,97	3,75	3,11	3,37	3,07	2,81	2,48	2,98	3,17
Fibre 9	2,89	2,98	3,82	2,67	2,87	3,33	2,74	2,53	2,74	3,26	2,71	2,87	2,12	2,89
Fibre 10	3,49	3,77	2,85	3,77	3,59	3,83	3,81	3,97	2,84	3,05	3,57	3,77	3,04	3,49



### **3.3 Observation de la fibre de Chanvre**

#### **3.3.1 Introduction**

Contrairement à la fibre de coco, la fibre de chanvre est plus compliquée à observer, à cause des diverses raisons détaillées dans le chapitre 2. De plus, comme cité dans le chapitre 1, la fibre de chanvre a différentes morphologies en fonction de l'endroit où elle a été extraite depuis la tige de la plante. Ainsi, il est important de connaître les caractéristiques de celle-ci afin de pouvoir comparer la valeur de module d'Young obtenue à l'aide d'un logiciel de simulation avec les résultats expérimentaux fait lors de la thèse de Mme Ho Thi, qui a utilisé des fibres similaires pour ses essais en traction.

Le but de cette partie est, comme la partie précédente, de pouvoir établir des paramètres afin de créer un modèle numérique qui soit le plus proche possible de la réalité. Pour cela, une quinzaine de fibres de coco a été observée.

#### **3.3.2 La fibre de chanvre**

A cause de ses faibles dimensions, la fibre de chanvre a été plus difficile à observer. De nombreuses coupes montrent les fibres de chanvre collées entre elles formant un amas de fibre de mêmes dimensions que celles qui ont été observées par d'autres chercheurs, comme Ho Thi (2008) qui détermine que leur forme est quasi elliptique avec des dimensions moyennes de 200  $\mu\text{m}$  pour le grand axe et de 70  $\mu\text{m}$  pour le petit axe. La figure 3.3, montre cet amas de fibres de chanvre, dont les dimensions sont équivalentes : 70,76  $\mu\text{m}$  pour le grand axe et 24,67  $\mu\text{m}$  pour le petit axe.

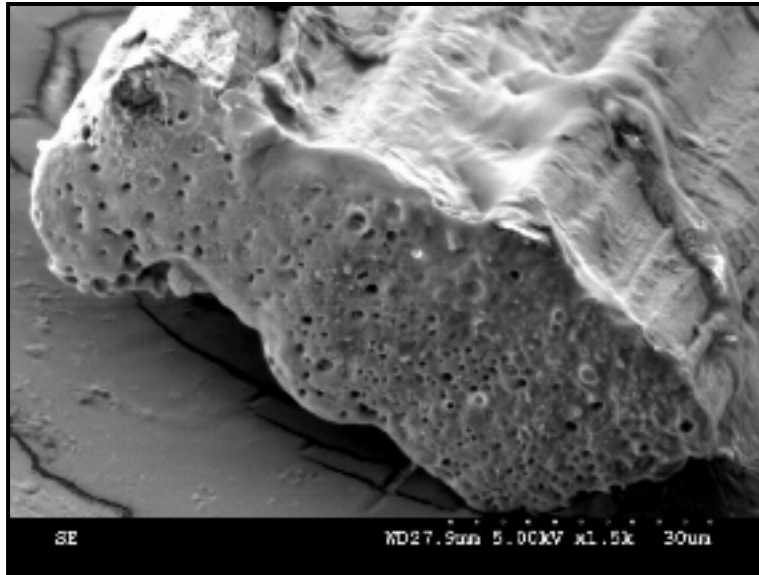


Figure 3.3 Coupe d'une section d'une fibre de chanvre

Grâce à cette méthode de coupe, il est possible de voir les fibres de chanvre dans cet amas. La figure 3.4a montre ces fibres de chanvre se rejoignant en un endroit pour former un amas de fibres collées, et la figure 3.4b montre une coupe où le laser n'a pas traversé toutes les fibres. En observant cet endroit, on aperçoit les fibres de chanvre formant cet amas. Il est donc possible d'établir la morphologie d'une seule fibre. À l'inverse des fibres de coco, il est difficile de voir la même fibre d'une coupe à l'autre. Une des raisons est que, comme le montre la figure 3.4a, seules les fibres en périphérie se séparent et qu'elles ont une probabilité plus grande d'être dégradées dû à la chaleur du laser. De plus, au vu de leur faible diamètre, il est extrêmement difficile d'extraire les fibres de chanvre de l'amas, et le risque que la coupe soit inexploitable est plus grand si on coupe une fibre de chanvre plutôt qu'un ensemble.

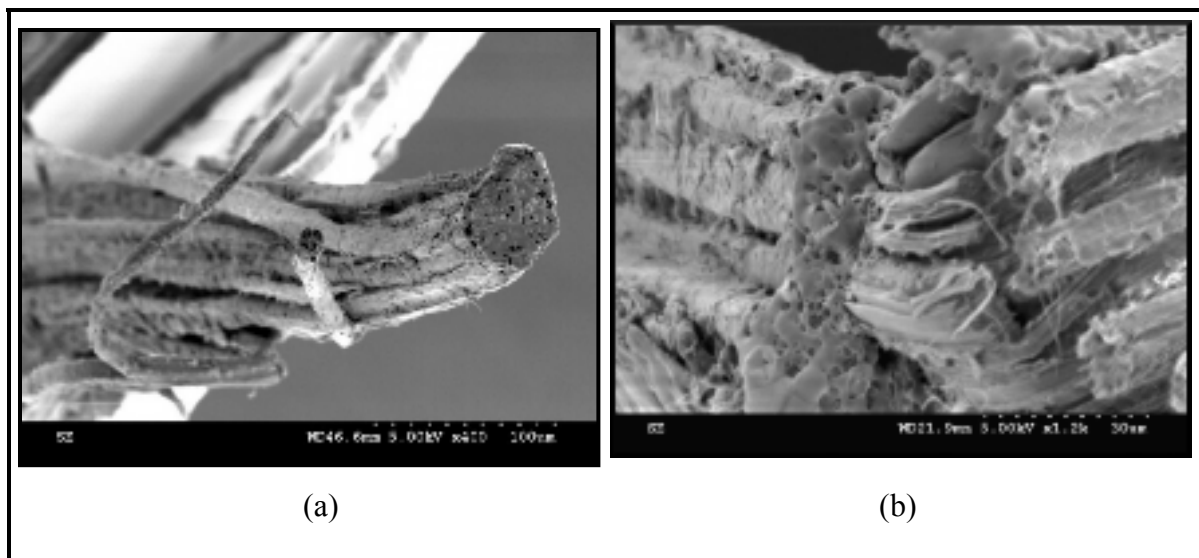


Figure 3.4 Observation de plusieurs fibres de chanvre

### 3.3.3 Interprétation

Les fibres de chanvre ne seront pas interprétées de la même façon que les fibres de coco. Comme le montrent les figures ci-dessus, il était compliqué de suivre une fibre de chanvre d'une coupe à l'autre, et ceci à cause du grand nombre de fibres de chanvre dans l'amas. De plus, sur la figure 3.4a, il est possible de voir que les fibres de chanvre sont torsadées, ce qui signifie qu'une fibre n'est pas forcément à la même position d'une coupe à la suivante. Ainsi, il est quasiment impossible, contrairement à la fibre de coco où il était possible de ne couper qu'une seule fibre, de pouvoir étudier les dimensions de la fibre de chanvre d'une coupe à l'autre. En effet, pour être sûr d'avoir une coupe exploitable, il était nécessaire de couper un amas de fibres de chanvre plutôt qu'une seule.

Pour modéliser la fibre de chanvre, il faut connaître les caractéristiques de sa morphologie. Avant de commencer à étudier les dimensions de la fibre de chanvre, une observation de plusieurs coupes a été étudiée pour savoir si les fibres de chanvre étudiées dans ce mémoire ont des similitudes avec des fibres de chanvre étudiées par d'autres chercheurs. La figure 3.6 montre quelques coupes où la morphologie est la plus visible. Tout comme les fibres de coco, les fibres de chanvre, ainsi que leur lumen, ont une forme elliptique.

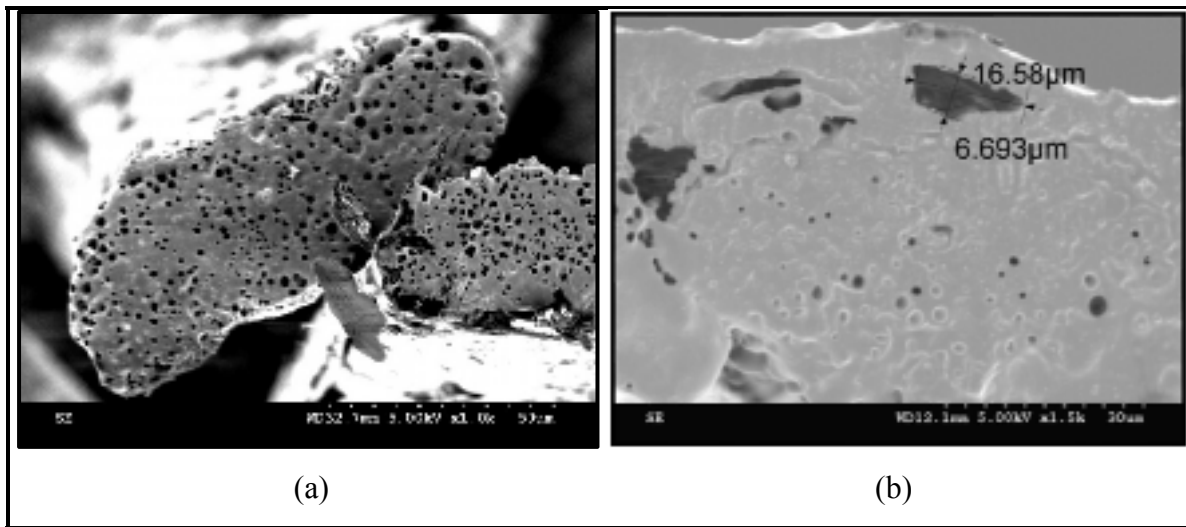


Figure 3.5 Coupe de plusieurs fibres de chanvre

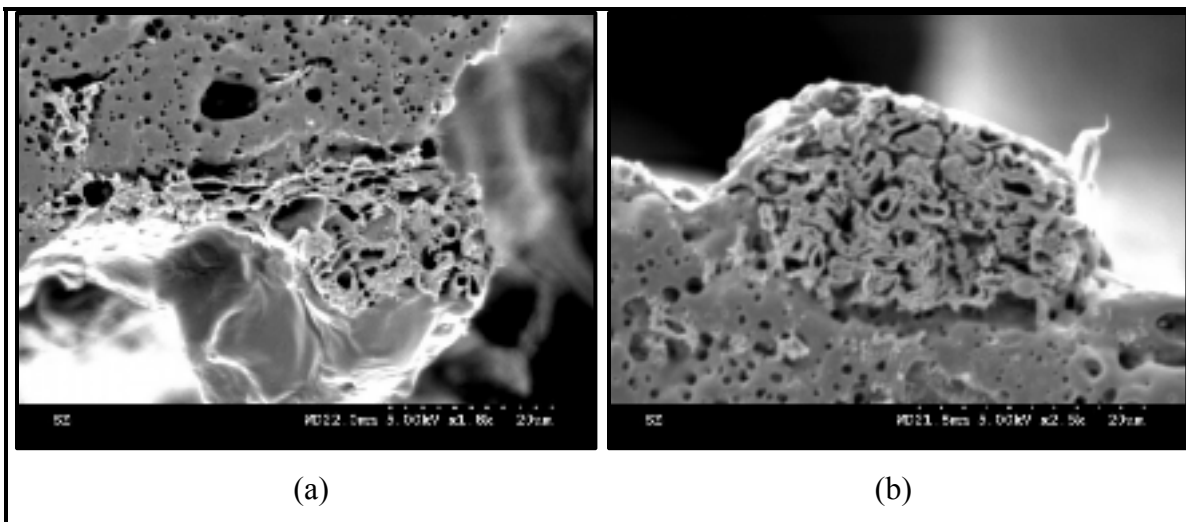


Figure 3.6 Coupe d'une fibre de chanvre

La figure 3.7 montre la morphologie de deux fibres de chanvre, il est ainsi possible de constater que celle-ci est composée de plusieurs fibres élémentaires, comme la fibre de coco. Le problème de cette observation est qu'il n'y a pas d'étude qui montre que la fibre de chanvre est composée de fibres élémentaires. Cela signifie, d'après les recherches faites sur l'extraction ces fibres de chanvre, que les fibres utilisées dans ce mémoire seraient des fibres secondaires issues du phloème secondaire (figure 1.12), et qu'au vu de leur petite taille, la fibrillation n'a pas pu les séparer. Ainsi, ces fibres secondaires seraient restées entre elles,

formant un amas de fibres avec des dimensions plus grande et plus semblable à celles décrites dans d'autres études du chanvre (Placet et al., 2012) où les dimensions de ces fibres varient de 15 à 50  $\mu\text{m}$ .

Pour cette étude, seules les fibres élémentaires sont étudiées pour être modélisées. Dans ce cas, les fibres élémentaires vont faire l'objet d'une analyse. Le tableau 3.7 donne les dimensions du lumen, en considérant que la section des fibres secondaires est elliptique, avec les diamètres « D » et « d », ainsi que l'épaisseur. Bien que 15 amas de fibres aient été coupés, seule une quinzaine de fibres élémentaires de chanvre ont été mesurées. Ce faible nombre de mesures est dû en grande partie à la difficulté de distinguer correctement les fibres élémentaires.

Tableau 3.7 Observation des fibres élémentaires de chanvre

Observations	Diamètre du lumen		Épaisseurs de la paroi de la fibre élémentaire (µm)
	a (µm)	b (µm)	
1	1,30	0,79	0,95
2	1,42	0,80	0,80
3	2,07	0,64	0,82
4	2,75	0,96	1,06
5	1,70	1,12	0,65
6	3,19	1,27	1,13
7	2,29	1,32	0,96
8	5,79	1,54	2,18
9	4,97	2,26	1,23
10	4,91	2,77	1,76
11	3,47	2,98	1,30
12	3,83	3,11	2,26
13	6,41	3,87	1,95
14	7,41	4,41	2,60
15	1,58	0,92	0,96
moyenne	3,54	1,99	1,37

Le tableau 3.7 montre bien que les dimensions du lumen des fibres élémentaires sont très faibles. Le lumen varie de 1,30 µm à 7,41 µm pour le grand diamètre, avec une épaisseur variant de 0,7965 µm à 2,604 µm. On remarque, contrairement à la fibre de coco, que l'épaisseur des fibres élémentaires de chanvre n'est pas constante. On peut y voir une relation avec la taille du lumen : plus celui-ci est grand, plus l'épaisseur de la paroi sera grande.

## **CHAPITRE 4**

### **ÉLABORATION D'UN MODÈLE ET DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE**

#### **4.1 Introduction**

Dans la recherche d'une compréhension des propriétés élastiques des fibres végétales, il a été essentiel d'avoir des outils théoriques pour relier la structure et les propriétés mécaniques dans un modèle global. Récemment, de nombreux chercheurs se sont préoccupés d'analyser et même de modéliser l'influence de paramètres physiques sur les propriétés élastiques des fibres naturelles. Une des premières théories a été présentée par Hearle (1963), au sein de laquelle les fibres naturelles ont été considérées comme un matériau composite, constitué de trames fibrillaires cristallines de cellulose incorporée dans une matrice amorphe. Plus récemment, la paroi cellulaire des fibres naturelles fut suggérée, par Salmén et al. (1986), en considérant un composite polymérique multicouches avec des couches de microfibrilles de cellulose à différents angles par rapport à l'axe de la fibre.

#### **4.2 Modélisation d'une fibre naturelle**

##### **4.2.1 Modèle utilisé dans ce mémoire**

Le modèle élaboré pour estimer les propriétés élastiques d'une fibre végétale est souvent assimilé à un cylindre creux composé de quatre couches (P, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> et S<sub>3</sub>), comme le montre la figure 4.1. Dans ce type de modèle, chacune de ces couches est représentée avec une proportion différente et un AMF spécifiques.

Néanmoins, dans les modèles numériques qui vont être effectués par la suite, un modèle simplifié des fibres végétales sera utilisé comme montré sur la figure 4.1. Le but d'analyser un modèle simplifié sera de se consacrer à une étude microscopique et masoscopique : microscopique, dans l'étude de la variation de la morphologie, et masoscopique, dans l'étude

de la composition chimique. Ainsi, seule la couche  $S_2$  sera prise en compte, puisque qu'elle correspond à 90% de la paroi de la fibre élémentaire, comme indiqué dans le paragraphe 1.2 : le comportement de la fibre élémentaire va suivre celui de la couche  $S_2$ .

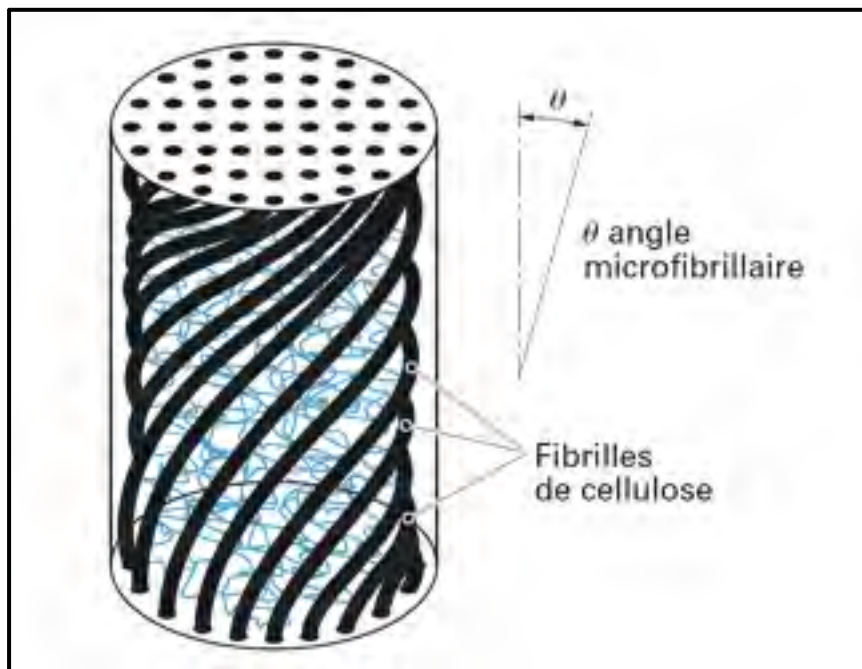


Figure 4.1 Schéma simplifié d'une fibre végétale  
Tiré de Hearle (1963, p.1209)

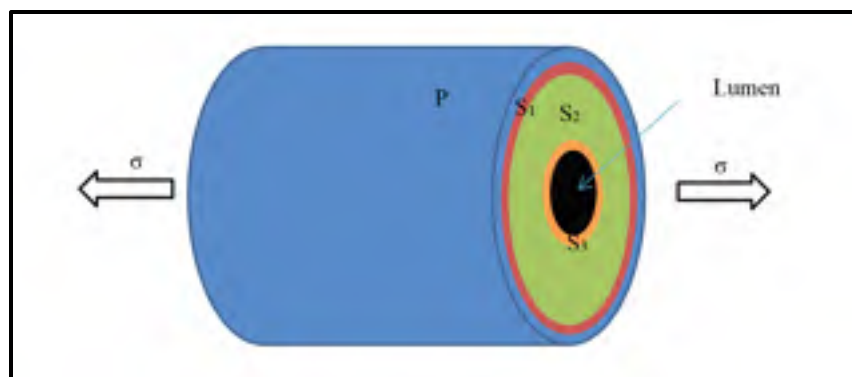


Figure 4.2 État de contraintes longitudinales



Si on considère une fibre élémentaire avec ses quatre couches, comme illustré à la figure 4.2, et qui est soumise à une contrainte  $\sigma$  normale suivant l'axe de la fibre, il en découle la relation suivante :

$$E_L = V_P * E_P + V_{S1} * E_{S1} + V_{S2} * E_{S2} + V_{S3} * E_{S3} \quad (4.1)$$

Où E et V représentent, respectivement, le module d'Young et la fraction volumique de chacune des couches de la fibre. Par ailleurs, les couches P, S<sub>1</sub> et S<sub>3</sub> sont très fines par rapport à la couche S<sub>2</sub>, donc leur fraction volumique sera très faible, ce qui occasionnera un impact minime sur le module d'Young longitudinal.

En plus de cette hypothèse-ci, d'autres hypothèses ont été utilisées comme :

- Une interface renfort-matrice parfaite ;
- Des microfibrilles et une matrice homogènes, élastiques et linéaires ;
- Des microfibrilles continues et parallèles ;
- Des microfibrilles et une matrice orthotrope.

#### **4.3      Calculs théoriques des modules d'élasticité de chacune des couches par rapport aux axes naturels des microfibrilles.**

Dans cette partie, une étude théorique sera effectuée sur la détermination des propriétés mécaniques. Comme évoqué dans le chapitre 2, dans certains modèles de fibres naturelles (Placet et al., 2012), les renforts et la matrice sont considérés comme étant des matériaux composites. La cellulose cristalline et la cellulose amorphe composent les renforts et différents matériaux composent la matrice, telle que l'hémicellulose, la lignine ou encore la pectine pour ne citer que les plus courants. Ainsi, les propriétés mécaniques de ces deux éléments, renforts et matrice, doivent être calculées dans un premier temps. Dans un second temps, il sera possible de connaître les propriétés mécaniques d'une couche qui compose une fibre.

Ainsi, les modules d'élasticité des microfibrilles, de la matrice et de la couche d'une fibre sont détaillés dans les sous-parties suivantes. Ces calculs présentés ci-dessous sont tirés de la loi des mélanges (Gibson, 2011).

#### 4.3.1 Calculs des modules d'élasticité des microfibrilles

Le calcul des modules d'élasticité de chacune des couches s'effectue en plusieurs étapes. Premièrement, les propriétés mécaniques des microfibrilles sont calculées grâce à la loi des mélanges classique où les formules sont présentées ci-dessous. Pour cela, les propriétés mécaniques de la cellulose cristalline (CC) et de la cellulose amorphe (AC) sont utilisées. En considérant les microfibrilles comme un matériau composite, il a été fait comme choix que la cellulose cristalline jouera le rôle du renfort et que la cellulose amorphe jouera le rôle de la matrice.

Pour expliquer la différence entre les équations 4.2 et 4.3, il faut comprendre comment réagit les microfibrilles lorsqu'ils subissent un chargement. Pour connaître le module d'Young longitudinal, on se place dans le cas où le chargement est dans la même direction que l'axe des microfibrilles. Dans ce cas-là, on peut considérer que les renforts en CC sont « en parallèle ». Ainsi, le module d'Young longitudinal des microfibrilles sera égal à la somme des modules d'Young longitudinaux de ces compositions multipliés par leur fraction volumique.

Le module d'Young longitudinal des microfibrilles ( $E_f^L$ ) :

$$E_f^L = V_{cc} * E_{cc}^L + V_{ac} * E_{ac} \quad (4.2)$$

Pour le module d'Young transversal, le chargement appliqué sur la fibre sera perpendiculaire à l'axe des microfibrilles. Dans ce cas-ci, on peut considérer que les renforts en CC sont « en série ». Ainsi, l'inverse du module d'Young transversal des microfibrilles sera égal aux

inverses des modules d'Young transversal de ces composants auxquels on multiplie leur fraction volumique.

Le module d'Young transversal des microfibrilles ( $E_f^T$ ) :

$$\frac{1}{E_f^T} = V_{cc} * \frac{1}{E_{cc}^T} + V_{ac} * \frac{1}{E_{ac}} \quad (4.3)$$

Le module de cisaillement des microfibrilles ( $G_f^{LT}$ ) :

$$\frac{1}{G_f^{LT}} = V_{cc} * \frac{1}{G_{cc}^{LT}} + V_{ac} * \frac{1}{G_{ac}} \quad (4.4)$$

Le coefficient de Poisson des microfibrilles ( $\nu_f^{TL}$ ) :

$$\nu_f^{TL} = V_{cc} * \nu_{cc}^{TL} + V_{ac} * \nu_{ac} \quad (4.5)$$

Où  $V_{cc}, E_{cc}^L, E_{cc}^T, G_{cc}^{LT}, \nu_{cc}^{TL}$  sont respectivement la fraction volumique, le module d'Young longitudinal, le module d'Young transversal, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson de la cellulose cristalline. Et  $V_{ac}, E_{ac}, G_{ac}, \nu_{ac}$  sont respectivement la fraction volumique, le module d'Young, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson de la cellulose amorphe.

La fraction volumique de chacun des deux composants est obtenue grâce aux relations suivantes :

$$V_{cc} = \frac{W_{cc}}{\rho_{cc}} * \rho_{microfibrille} \quad (4.6)$$

Et

$$V_{ac} = \frac{W_{ac}}{\rho_{ac}} * \rho_{microfibrille} \quad (4.7)$$

Où  $W_{cc}$  et  $W_{ac}$  sont, respectivement, la fraction massique de la cellulose cristalline et de la cellulose amorphe dans la couche S<sub>2</sub>.

La masse volumique des microfibrilles ( $\rho_{microfibrille}$ ) est obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_{microfibrille} = \frac{W_{cc}}{W_{microfibrille}} * \rho_{cc} + \frac{W_{ac}}{W_{microfibrille}} * \rho_{ac} \quad (4.8)$$

Où  $\rho_{cc}$  et  $\rho_{ac}$  sont, respectivement, la masse volumique de la cellulose cristalline et de la cellulose amorphe. Et  $W_{microfibrille}$  est la fraction massique des microfibrilles dans la couche S<sub>2</sub>.

Ces deux fractions massiques,  $W_{cc}$  et  $W_{ac}$ , sont obtenues grâce à celle des microfibrilles. En effet, seuls la fraction massique des microfibrilles et le pourcentage de cellulose cristalline sont donnés. Ainsi, en posant  $P_{cc}$ , le pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose, les fractions massiques,  $W_{cc}$  et  $W_{ac}$ , sont obtenues par ces deux relations :

$$W_{cc} = W_{microfibrille} * P_{cc} \quad (4.9)$$

$$W_{ac} = W_{microfibrille} * (1 - P_{cc}) \quad (4.10)$$

### 4.3.2 Calculs des modules d'élasticité de la matrice

Deuxièmement, les propriétés mécaniques de la matrice sont calculées grâce à la loi des mélanges classique où les formules sont présentées ci-dessous. Pour cela, les propriétés mécaniques de l'hémicellulose (HC) et de la lignine (LG) sont utilisées. En considérant les microfibrilles comme un matériau composite, il a été fait comme choix que l'hémicellulose jouera le rôle du renfort et que la lignine jouera le rôle de la matrice.

Le module d'Young longitudinal de la matrice ( $E_{mat}^L$ ) :

$$E_{mat}^L = V_{hc} * E_{hc}^L + V_{lg} * E_{lg} \quad (4.11)$$

Le module d'Young transversal de la matrice ( $E_{mat}^T$ ) :

$$\frac{1}{E_{mat}^T} = V_{hc} * \frac{1}{E_{hc}^T} + V_{lg} * \frac{1}{E_{lg}} \quad (4.12)$$

Le module de cisaillement de la matrice ( $G_{mat}^{LT}$ ) :

$$\frac{1}{G_{mat}^{LT}} = V_{hc} * \frac{1}{G_{hc}^{LT}} + V_{lg} * \frac{1}{G_{lg}} \quad (4.13)$$

Le coefficient de Poisson de la matrice ( $\nu_{mat}^{TL}$ ) :

$$\nu_{mat}^{TL} = V_{hc} * \nu_{hc}^{TL} + V_{lg} * \nu_{lg} \quad (4.14)$$

Où  $V_{hc}$ ,  $E_{hc}^L$ ,  $E_{hc}^T$ ,  $G_{hc}^{LT}$ ,  $\nu_{hc}^{TL}$  sont respectivement la fraction volumique, le module d'Young longitudinal, le module d'Young transversal, le module de cisaillement et le coefficient de

Poisson de l'hémicellulose. Et  $V_{lg}$ ,  $E_{lg}$ ,  $G_{lg}$ ,  $\nu_{lg}$  sont respectivement la fraction volumique, le module d'Young, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson de la lignine.

La fraction volumique de chacun des deux composants est obtenue grâce aux relations suivantes :

$$V_{hc} = \frac{W_{hc}}{\rho_{hc}} * \rho_{matrice} \quad (4.15)$$

Et

$$V_{lg} = \frac{W_{lg}}{\rho_{lg}} * \rho_{matrice} \quad (4.16)$$

Où  $W_{hc}$  et  $W_{lg}$  sont, respectivement, la fraction massique de l'hémicellulose et de la lignine.

La masse volumique de la matrice ( $\rho_{matrice}$ ) est obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_{matrice} = \frac{W_{hc}}{W_{matrice}} * \rho_{hc} + \frac{W_{lg}}{W_{matrice}} * \rho_{lg} \quad (4.17)$$

Où  $\rho_{hc}$  et  $\rho_{lg}$  sont, respectivement, la masse volumique de l'hémicellulose et de la lignine. Et  $W_{matrice}$  est la fraction massique de la matrice.

Contrairement à l'obtention des propriétés mécaniques des microfibrilles, pour celles de la matrice, les fractions massiques,  $W_{hc}$  et  $W_{lg}$ , sont données. Seule la fraction massique de la matrice est à calculer. D'où la relation :

$$W_{matrice} = W_{hc} + W_{lg} \quad (4.18)$$

### 4.3.3 Calculs des modules d'élasticité d'un pli unidirectionnel

Une fois que les propriétés mécaniques des microfibrilles et de la matrice sont calculées, il reste à calculer les propriétés mécaniques du pli. Pour cela, la loi des mélanges améliorés sera utilisée afin d'obtenir au mieux les propriétés mécaniques du pli.

En effet, bien que les équations dérivées de la loi des mélanges donnent des résultats précis pour le module d'Young longitudinal, les coefficients de Poisson et le module de cisaillement, les résultats obtenus à l'aide de l'équation décrite précédemment pour le module d'Young transversal sont légèrement surestimés avec les résultats dérivés de l'analyse par les éléments finis (Srihara et al., 2013). Par conséquent, une autre équation du module d'Young transversal dérivée de la modification de la loi des mélanges doit être utilisée pour des résultats plus justes. L'équation 4.20 a donc été choisie pour pouvoir avoir une valeur du module transversale plus faible. Le choix de cette utilisation est que le modèle utilisé ne comprend pas tous les composants de la couche S<sub>2</sub>, ceux pour la raison que ces composants ont des propriétés négligeable devant ceux de l'hémicellulose et de la lignine. Ainsi, en choisissant cette équation tirée de Jacquet et al. (2000), La valeur du module transversale de la couche se rapprochera de la valeur d'un module transversale où tous les composants seraient pris en compte.

Comme pour la détermination des propriétés mécaniques des microfibrilles et de la matrice, les équations suivantes ont été utilisées :

Le module d'Young longitudinal du pli ( $E^L$ ) :

$$E^L = V_f * E_f^L + V_{mat} * E_{mat} \quad (4.19)$$

Le module d'Young transversal du pli ( $E^T$ ) (Jacquet et al., 2000):

$$E^T = \frac{E_f^T * E_{mat}^T}{E_{mat}^T + E_f^T * \frac{(1 - \sqrt{V_f})}{\sqrt{V_f}}} + (1 - \sqrt{V_f}) * E_{mat}^T \quad (4.20)$$

Le module de cisaillement de du pli ( $G^{LT}$ ) :

$$\frac{1}{G^{LT}} = V_f * \frac{1}{G_f^{LT}} + V_{mat} * \frac{1}{G_{mat}^{LT}} \quad (4.21)$$

Le coefficient de Poisson de du pli ( $\nu^{TL}$ ) :

$$\nu^{TL} = V_f * \nu_f^{TL} + V_{mat} * \nu_{mat}^{TL} \quad (4.22)$$

On constate que la somme de la fraction volumique des microfibrilles  $V_f$  avec celle de la matrice  $V_{mat}$ , n'est pas égale à 1. Cette différence est due au fait que d'autres composants de la fibre sont négligés. En effet, comme les propriétés mécaniques de ces matériaux, comme la pectine, sont négligeables, ils occupent un volume dans la fibre, mais sans intervenir dans la loi des mélanges. Ceci a pour effet d'augmenter le volume total de la fibre et donc de diminuer le pourcentage volumique affecté à chaque propriété mécanique dans la loi des mélanges, soit celui des microfibrilles et de la matrice, qui sont déterminés précédemment.

#### 4.4 Valeurs des propriétés d'élasticité des fibres selon l'axe des microfibrilles

Pour pouvoir déterminer les modules d'élasticité des fibres de coco et de chanvre, la connaissance des propriétés mécaniques de chacun des composants est nécessaire. Ainsi, en prenant en compte les données présentées dans tableau 1.2 du chapitre 1, on obtient une plage de ces valeurs. Pour obtenir les propriétés élastiques des composants de la fibre élémentaire présentées dans le tableau 4.1, il a fait comme choix, d'une part, de moyenner



ces valeurs obtenues par des chercheurs et, d'autre part, d'ajuster cette valeur en fonction de sa probabilité d'être obtenue par ces chercheurs : plus une valeur modules d'élasticité d'un composants sera obtenue par chercheurs, plus la valeur utilisée dans ce mémoire sera proche de celle-ci.

Tableau 4.1 Propriétés mécaniques des composants de la paroi de la fibre végétale

Composants	Cellulose cristalline	Cellulose amorphe	Hémicellulose	Lignine
$E_L$ (MPa)	140 000	9 000	7 500	3 000
$E_T$ (MPa)	27 200	9 000	3 750	3 000
$G_{LT}$ (MPa)	4 400	4 300	1 750	760
$V_{LT}$	0,1	0,23	0,2	0,3
$V_{TL}$	0,019	0,23	0,1	0,3
Densité	1,6	1,42	1,4	1,4

#### 4.4.1 Les propriétés d'élasticité des fibres de coco selon l'axe des microfibrilles

Le tableau 4.2 présente les valeurs de la composition chimique de la fibre élémentaire de coco utilisée pour calculer les propriétés élastiques des microfibrilles et de la matrice. Cette valeur est donnée par la même équation 4.6 et par les valeurs présentes dans le tableau 4.1.

Tableau 4.2 La composition de la paroi de la fibre de coco

Composants	Cellulose (Pourcentage de cellulose cristalline)		Hémicellulose	Lignine	Autre
Fraction massique (%)	43 (60%)		0,2	45	11,8
Fraction volumique (%)	cellulose cristalline	cellulose amorphe	0,2	47,0	11,5
	23,6	17,7			

Une fois que les fractions volumiques sont connues, l'obtention des propriétés élastiques des microfibrilles et de la matrice composant le coco doit être faite pour pouvoir effectuer un modèle numérique. Pour cela, un programme basé sur les équations citées ci-dessus a été écrit avec le logiciel MATLAB, donné en annexe III, afin d'obtenir les valeurs des propriétés élastiques de la fibre de coco. La première partie du programme calcule les modules d'élasticité des microfibrilles et de la matrice, donnés dans le tableau 4.3. La seconde partie du programme permet de calculer les propriétés élastiques de la fibre élémentaire de coco, données dans le tableau 5.3.

Tableau 4.3 Les propriétés élastiques des microfibrilles et de la matrice composant le coco

Composants	$E_L$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$G_{LT}$ (MPa)	$V_{LT}$	$V_{TL}$
Microfibrilles	84 100	14 500	4 340	0,16	0,027
Matrice	3 000	3 000	762	0,23	0,30
Coco	36 000	5 000	1 400	0,21	0,029

#### 4.4.2 Les propriétés d'élasticité des fibres de chanvre selon l'axe des microfibrilles

Le tableau 4.4 présente les valeurs de la composition chimique de la fibre élémentaire de chanvre. Ces valeurs ont été obtenues de la même façon que pour celle du coco.

Tableau 4.4 Composition de la paroi de la fibre de chanvre

Composants	Cellulose (Pourcentage de cellulose cristalline)		Hémicellulose	Lignine	Autres
Fraction massique (%)	70 (60%)		15	4	11
Fraction volumique (%)	cellulose cristalline	cellulose amorphe	16,1	4,3	10,6
	39,4	29,6			

De la même manière que pour le coco, les propriétés élastiques des microfibrilles et celles de la matrice composant le chanvre ont été déterminées à l'aide du même programme (annexe III), et présentées dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 Propriétés élastiques des microfibrilles et de la matrice composant le chanvre

Composants	$E_L$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$G_{LT}$ (MPa)	$V_{LT}$	$V_{TL}$
Microfibrilles	84 100	14 500	4 340	0,16	0,027
Matrice	6 550	3 560	1 370	0,22	0,12
Chanvre	59 100	8 500	3 260	0,16	0,022

## 4.5 Modélisation des fibres de coco et de chanvre

### 4.5.1 Introduction

De nombreuses modélisations ont été effectuées dans le but de connaître au mieux le comportement des fibres végétales. Que ce soit pour le coco ou le chanvre, seul le comportement en traction, et donc le module d'Young, des fibres élémentaires sera déterminé. Au vu des observations effectuées, la modélisation des fibres de coco et de chanvre serait compliquée à exploiter, notamment à cause du nombre élevé de paramètres qui interviennent : diamètre de la fibre, diamètre du lacuna (dans le cadre de la fibre de coco), nombre de fibres élémentaires, épaisseur des fibres élémentaires, forme des fibres élémentaires, pour ne citer que quelques paramètres. La figure 4.3 montre une modélisation possible d'une fibre de coco.

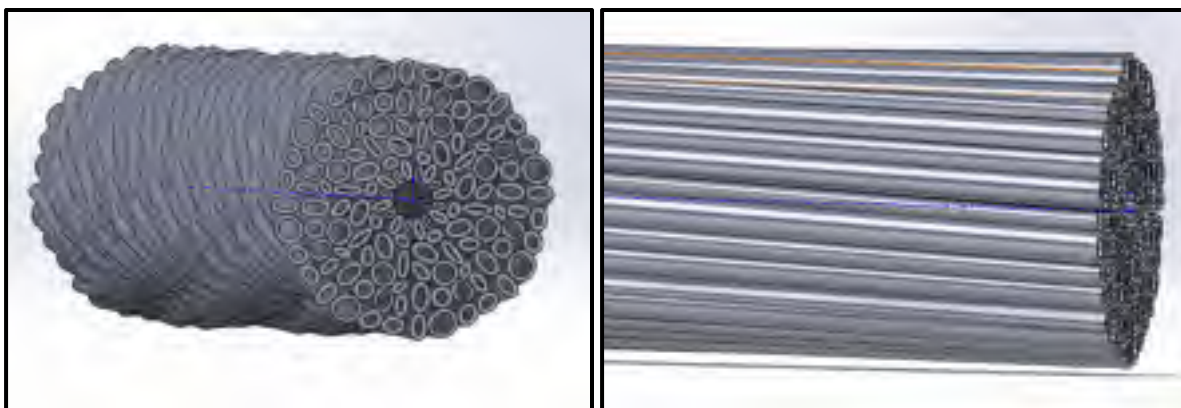


Figure 4.3 Exemple de modélisation d'une fibre de coco

Au vu de tous ces paramètres, il serait particulièrement complexe de déterminer quel paramètre intervient dans l'obtention du résultat, et il est donc quasiment impossible d'expliquer le résultat.

Le but de ces modélisations est de pouvoir valider ou invalider certaines des hypothèses présentes au chapitre 1. C'est pour cette raison qu'un modèle simplifié est utilisé. Contrairement aux modèles mathématiques, capables d'expliquer la composition chimique de chacune des couches de la fibre élémentaire (Placet et al., 2012), ces modèles ont pour objectif de comprendre l'interaction entre certains paramètres et le module d'Young de la fibre élémentaire.

Au vu des parallèles établis entre les fibres végétales, de nombreuses similitudes seront effectuées afin d'obtenir la plus juste des modélisations de coco et chanvre. Cependant, comme détaillé dans le chapitre 1, plusieurs hypothèses peuvent apporter une explication aux comportements des fibres lors d'un test de traction.

#### 4.5.2 Logiciels utilisés

Pour la conception des modèles, le logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) *SolidWorks* a été utilisé. Pour la modélisation structurale, ce fut le logiciel d'éléments finis ANSYS Version 17.2 avec l'aide de trois modules : *Design Modeler*, *Mechanical* et *ANSYS Composite PrepPost* (ACP). Pour ce mémoire, le logiciel ACP a été choisi puisqu'il permet de faire varier l'épaisseur de la paroi des modèles numériques, et il permet également d'orienter les matériaux, c'est-à-dire qu'il est possible de choisir et de modifier l'AMF de chacune des deux fibres. Cependant, pour travailler sous ACP, les modèles seront créés comme des corps surfaciques (Shell) et non comme des solides. Pour l'interprétation des résultats, le mode corps surfaciques permet d'obtenir de bons résultats sur des modèles ayant des parois faibles. Mais, sur des parois plus épaisses, les résultats peuvent avoir un écart relatif avec la réalité.

#### 4.5.3 Géométrie

Pour la géométrie, des corps surfaciques sont utilisés pour la représentation des fibres. Ce choix est dû à l'utilisation du module ACP pour la caractérisation du module d'Young. Pour les dimensions du lumen et de l'épaisseur de la paroi, des moyennes ont été prises pour modéliser les fibres de coco et de chanvre. Chacune des deux fibres a été modélisée avec une forme circulaire et elliptique. Au vu des observations et des résultats obtenus dans le chapitre 3, il a été choisi de prendre les dimensions suivantes pour la fibre de coco et celle de chanvre : soit 13  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$  pour les dimensions du lumen et une épaisseur de 3  $\mu\text{m}$  pour la fibre élémentaire de coco. Pour la fibre élémentaire de chanvre, un lumen ayant les dimensions suivantes a été retenu : 3,5  $\mu\text{m}$  pour le grand axe et 1,5  $\mu\text{m}$  pour le petit axe, avec une épaisseur de 1  $\mu\text{m}$ , comme présentées sur les figures 4.4a et 4.5a. Pour la forme cylindrique des deux fibres, le choix a été de garder l'aire de la surface de la section et l'épaisseur des parois constantes avec le modèle elliptique afin de voir seulement l'influence de la forme de la fibre. Ces modèles sont présentés sur les figures 4.4b et 4.5b. En faisant ce

choix de modèles, la théorie qui est appliquée derrière est celle des plaques unidirectionnelles où l'AMF fait un angle avec les coordonnées globales de la plaque.

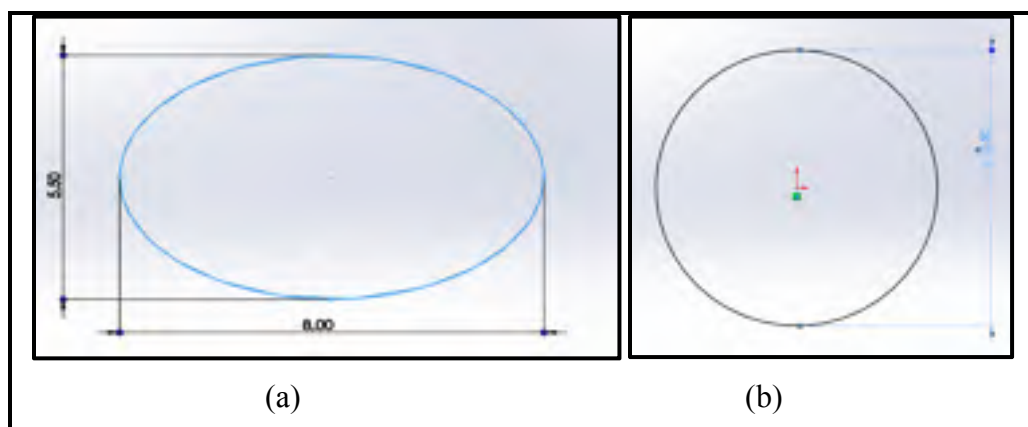


Figure 4.4 Géométrie des modèles numériques avec une section circulaire (a) et une section elliptique (b) pour le coco

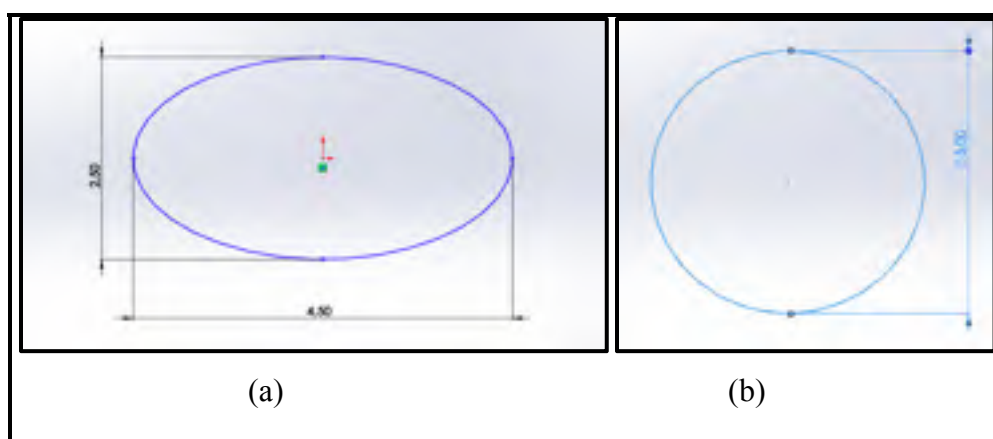


Figure 4.5 Géométrie des modèles numériques avec une section circulaire (a) et une section elliptique (b) pour le chanvre

La longueur des modèles a été choisie en fonction de l'étude de Tran et al. (2015). Lors de cette étude, ils se sont intéressés à morphologie de fibres élémentaires du coco, et ils ont observé que la longueur de celle-ci varie entre 350 à 950  $\mu\text{m}$  (figure 4.6). Ainsi, pour ce mémoire, une longueur de 500  $\mu\text{m}$  a été choisie.

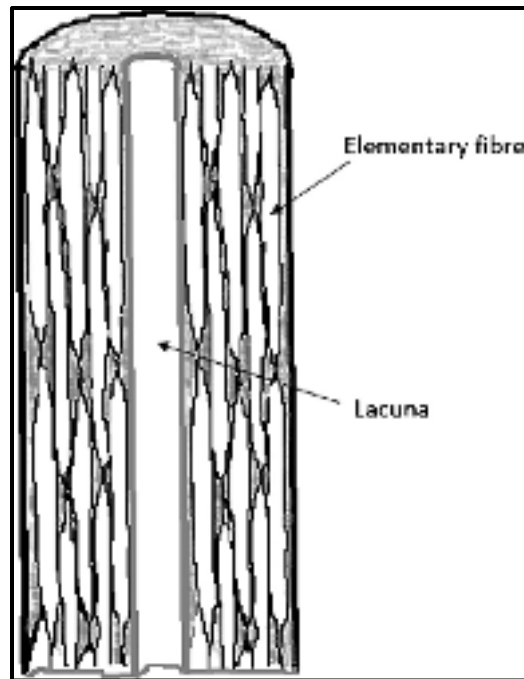


Figure 4.6 Schéma représentatif  
d'une fibre de coco  
Tirée de Tran et al. (2015, p. 441)

#### 4.5.4 Système de coordonnées

Pour cette étude, il y a deux systèmes de coordonnées : l'un pour le module *ACP* et l'autre pour le module *Mechanical*. Le système de coordonnées dans le module *ACP* permet d'orienter le sens des matériaux. Par défaut, les paramètres du module *ACP* ne permettent de ne déplacer que l'axe X (figure 4.7). Ceci implique que les valeurs des modules longitudinales calculées dans les paries précédentes, doivent être placé suivant l'axe des X, et les modules transversaux, suivant les axes Y et Z (figure 4.8 et 4.9). Le changement d'angle suivant l'axe des X, entraînera un changement de l'angle des microfibrilles.



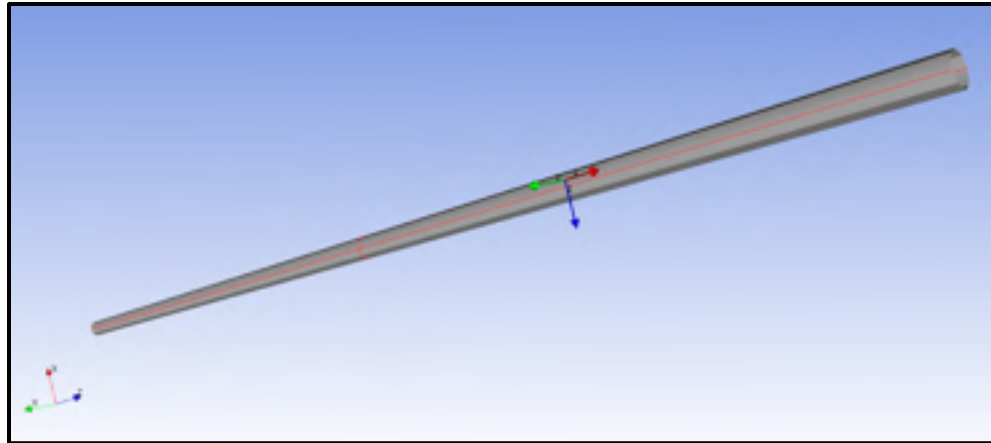


Figure 4.7 Système de coordonnées sous ACP

Propriétés de ligne d'arborescence 1 : Chanvre\_0degre\_40C\_50CC\_1

	A	B	C	D	E
1	Propriété	Valeur	Unité		
2	Elasticité orthotrope				
3	Module de Young - Direction X	59147	MPa		
4	Module de Young - Direction Y	8499,3	MPa		
5	Module de Young - Direction Z	8499,3	MPa		
6	Coefficient de Poisson - XY	0,1525			
7	Coefficient de Poisson YZ	0,0219			
8	Coefficient de Poisson XZ	0,1525			
9	Module de cisaillement - XY	3261,3	MPa		
10	Module de cisaillement - YZ	3261,3	MPa		
11	Module de cisaillement - XZ	3261,3	MPa		

Figure 4.8 Propriétés mécaniques de la fibre élémentaire de chanvre

Propriétés de ligne d'arborescence 20 : Coco\_0degre\_40C\_50CC\_1

	A	B	C	D	E
1	Propriété	Valeur	Unité		
2	Elasticité orthotrope				
3	Module de Young - Direction X	36034	MPa		
4	Module de Young - Direction Y	4996	MPa		
5	Module de Young - Direction Z	4996	MPa		
6	Coefficient de Poisson - XY	0,2058			
7	Coefficient de Poisson YZ	0,0285			
8	Coefficient de Poisson XZ	0,2058			
9	Module de cisaillement - XY	1399,6	MPa		
10	Module de cisaillement - YZ	1399,6	MPa		
11	Module de cisaillement - XZ	1399,6	MPa		

Figure 4.9 Propriétés mécaniques de la fibre élémentaire de coco

Le système de coordonnées sur le module *Mechanical* n'a aucune relation avec celui d'*ACP*. Celle-ci est un système de coordonnées globales qui permettra de placer correctement les conditions initiales, et de connaître les différents paramètres : contraintes, déformations et déplacements suivant un axe particulier. L'axe Z désignera l'axe de la fibre (figure 4.10).

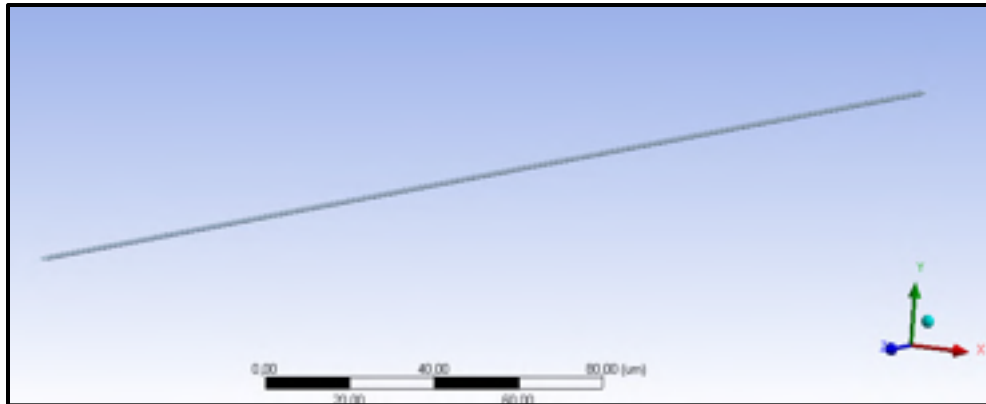


Figure 4.10 Système de coordonnées sous *Mechanical*

#### 4.5.5 Maillage

Au vu des simplifications prises, et détaillées au chapitre 5, un maillage grossier n'est pas utile. Pour les quatre types de modèles, le même maillage a été appliqué. Étant donné que les modèles sont des corps surfaciques, une *Méthode des quadrilatères/triangles MultiZone* a été utilisée pour la longueur de la fibre. Cette méthode permet de choisir le type de maillage de la face : ici un maillage de quadrilatères et une taille des éléments imposée à 1  $\mu\text{m}$  ou 500 divisions sur la longueur. Pour la surface du modèle, un nombre de divisions de 10 éléments a été choisi grâce à la méthode *Dimensionnement de l'arrête* (figure 4.11 et 4.12). Ce type de maillage permet d'avoir de 6680 nœuds, pour les modèles de chanvre, à 15358 nœuds, pour les modèles de coco et de 6,599 éléments pour les modèles de chanvre à 15328 éléments pour les modèles de coco.

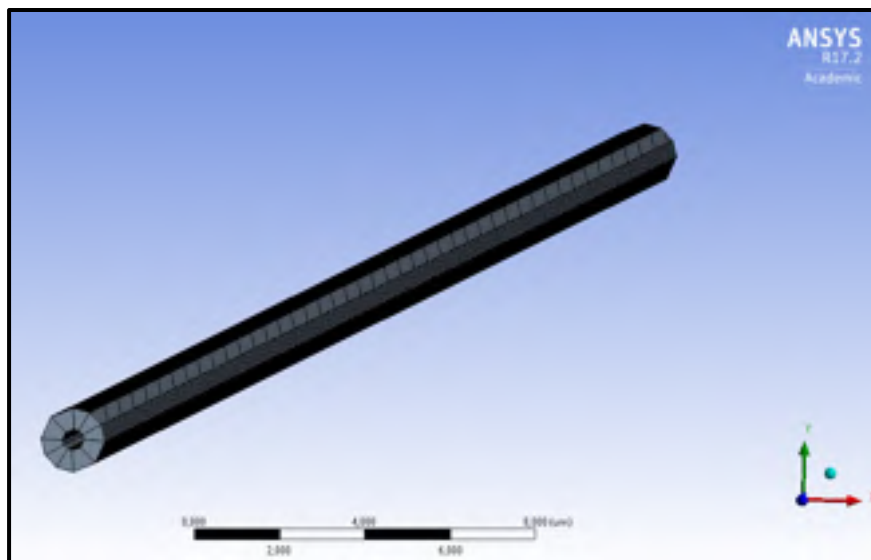


Figure 4.11 : Maillage pour un modèle de forme circulaire

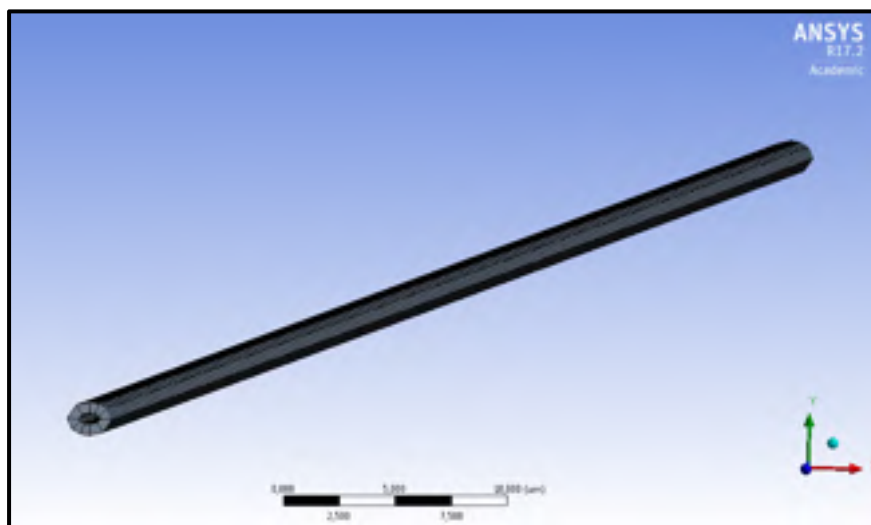


Figure 4.12 Maillage pour un modèle de forme elliptique

#### 4.5.6 Les conditions initiales

Le but de ce modèle étant de déterminer le module d'Young, il est judicieux d'imposer un déplacement à la fibre. Après résolution du modèle, ANSYS sera capable de donner les contraintes, ce qui permettra finalement de connaître le module d'Young grâce à l'équation d'Hooke (équation 5.23).

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (4.23)$$

Pour toutes les modélisations, une extrémité sera fixe (encastrement), tandis qu'un déplacement de 5  $\mu\text{m}$  sera imposé à l'autre extrémité. Le déplacement de 5  $\mu\text{m}$  a été choisi pour obtenir une déformation inférieure à la déformation de rupture de la fibre de chanvre. Le tableau 5.1 montrant des résultats obtenus lors d'essais en traction de la fibre de chanvre, il est convenable d'avoir une déformation de  $\varepsilon = 0,01$ , soit un déplacement de 5  $\mu\text{m}$  pour une longueur des modèles de 500  $\mu\text{m}$ . Les figures 4.13a et 4.13b illustrent les conditions initiales sur l'un des modèles.

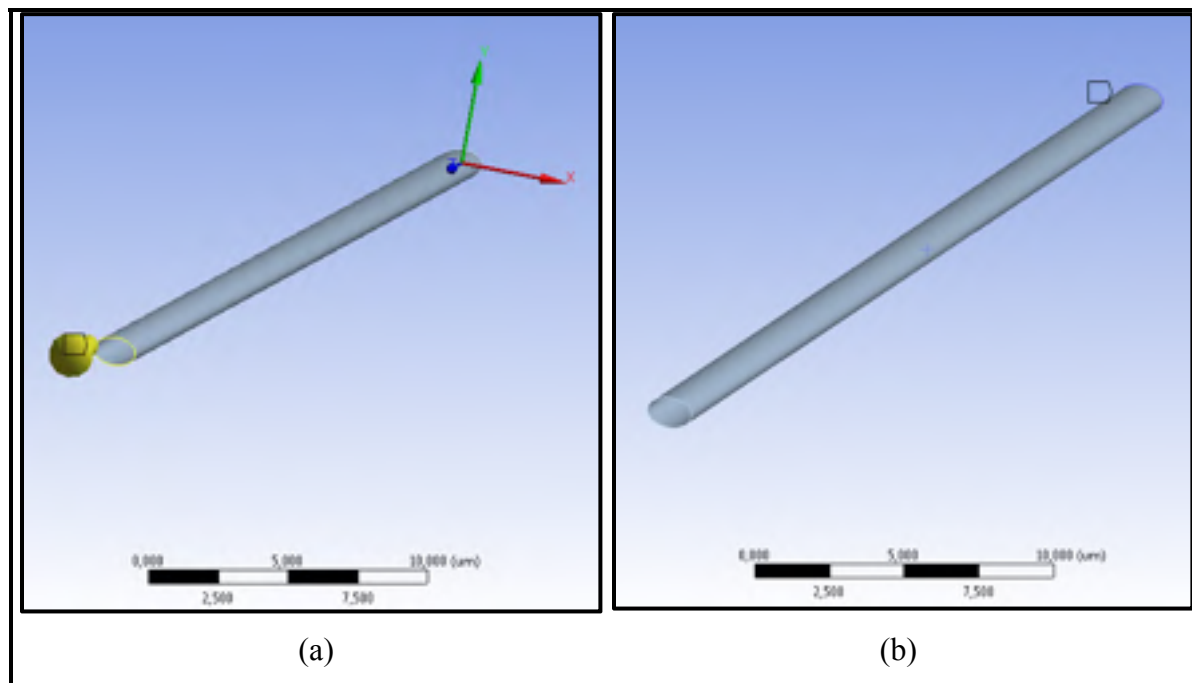


Figure 4.13 Conditions initiales imposées aux modèles : le déplacement imposé (a) et section fixe (b)

## **CHAPITRE 5**

### **RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION**

#### **5.1 Introduction**

L'objectif de ce chapitre sera, d'une part, de comparer les résultats obtenus avec ceux de la littérature, et d'autre part, d'établir des relations entre la morphologie ou la composition chimique de la fibre élémentaire de coco et chanvre avec le module d'Young.

Pour le choix de l'angle des microfibrilles, un angle moyen a été choisi pour la fibre élémentaire de coco, soit  $40^\circ$ . Pour le chanvre, le choix de cet angle est plus délicat. Lorsque des chercheurs ont tenté de connaître la valeur de l'AMF du chanvre, ils ont obtenu un AMF compris entre  $8$  et  $11^\circ$ . Cependant, en analysant les courbes contrainte-déformation des fibres de chanvre, trois zones sont distinctes (figure 5.1). La première zone correspond au début de chargement, la zone III correspond à la partie linéaire, avant la rupture de la fibre, et la zone II a une forme incurvée. Cette zone est due à une réorientation des fibrilles dans la matrice. En effet, à cause faible degré de l'AMF lors d'un effort suivant la direction de l'axe de la fibre, l'énergie transmise dans les fibrilles sera suffisamment élevée pour leur permettent de s'aligner suivant l'axe de la fibre. Ainsi, lors de l'essai en traction, l'AMF des fibres de chanvre n'est pas de  $8$  à  $11^\circ$ , mais de  $0^\circ$ . C'est pour cette raison que l'AMF choisi pour la modélisation du chanvre est de  $0^\circ$ .

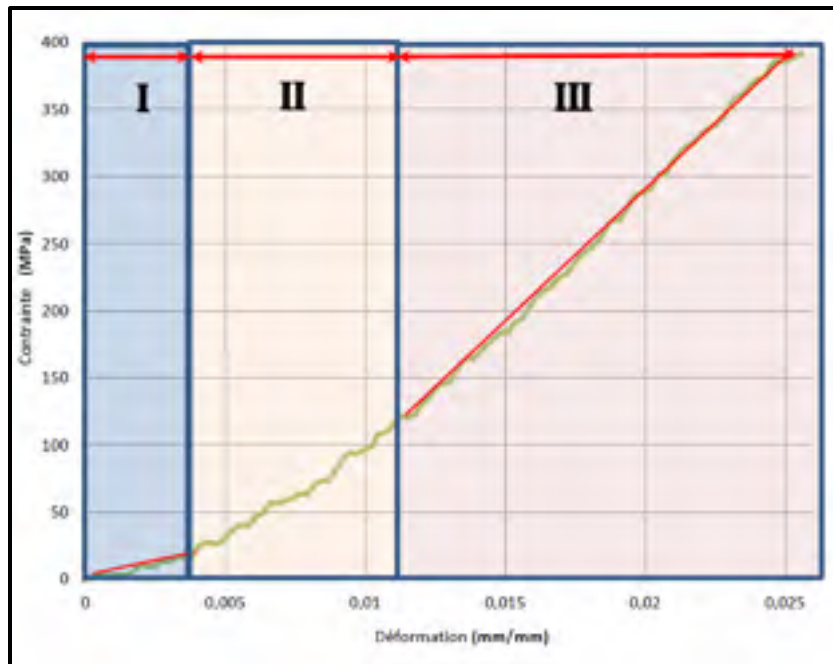


Figure 5.1 Courbe contrainte-déformation d'un amas de chanvre  
Tirée de Sefriou Manar (2014, p. 45)

## 5.2 Comparaison avec la littérature

Les premières simulations qui ont été faites ont permis d'estimer et de comparer les valeurs du module d'Young obtenues par la simulation des modèles présentés dans le chapitre 4 avec des valeurs obtenues par des essais de traction. Le tableau 5.2 reprend ces valeurs avec ceux de Mme Ho Thi, qui a utilisé des fibres similaires lors de sa thèse. Le premier constat qui peut être fait, est que les valeurs obtenues par la simulation sont plus élevées que les valeurs obtenues par les essais en traction de Mme Ho Thi. Cependant, en examinant la littérature, le module d'Young peut avoir une variation de 10 GPa (Duval et al., 2011) à 90 GPa (Keller, 2003) pour les fibres de chanvre (tableau 5.1), et peut avoir une variation de 1,2 GPa (Tomczal et al., 2007) à 6 GPa (Geethemma et al., 1999), pour les fibres de coco. Ainsi, bien que les résultats soient élevés, ils restent dans la plage des valeurs obtenus lors d'essais en tractions.

Tableau 5.1 Propriétés mécaniques des fibres de chanvre selon plusieurs études  
 Tirée de Thygesen et al. (2001) (1), Baley (2002) (2), Duval et al. (2001) (3), Keller (2003) (4), de Li et al. (2004) (5), de Symington et al. (2009) (6), de Bodros et al. (2007) (7) et de Placet et al. (2012) (8)

E (GPa)	$\varepsilon$ (%)	Nombre de fibres	Diamètre des fibres	Taux de chargement (mm/min)	Condition (Température, humidité)	Auteurs
$24,9 \pm 10,6$	n/a	53	30 - 50	0,12	20 °C, 65 %	(1)
$44,5 \pm 19,1$	$1,8 \pm 0,7$	43	$17,7 \pm 7,6$	n/a	n/a	(2)
$19,6 \pm 19,9$	$3,0 \pm 1,5$	71	$17,1 \pm 4,7$	1	23 °C, 48 %	(3)
30 – 90	1,5 – 3,5	n/a	n/a	n/a	n/a	(4)
34	2,65	n/a	n/a	n/a	n/a	(5)
$64 \pm 55,5$	$2,0 \pm 0,5$	n/a	n/a	n/a	65%	(6)
35	1,6	n/a	n/a	n/a	n/a	(7)
$24,7 \pm 11,4$	$2,1 \pm 0,7$	30	$27,6 \pm 7,5$	0,12	23,5 1,5 °C, 50,5% 1%	(8)

Le deuxième constat qui peut être fait est qu'il y a une différence entre les valeurs obtenues avec une section circulaire et celles obtenues avec une section elliptique. Les valeurs obtenues pour une section elliptique sont plus légèrement plus élevées que celles obtenues pour une section circulaire. On observe une différence de 0,1 % pour le chanvre et de 3,9 % pour le coco. Cette différence, qui est assez faible, peut être due à deux critères. En premier lieu, les sections de chacun des deux modèles sont différentes : le fait que la fibre de coco possède une section plus grande que celle du chanvre peut engendrer une plus grande variation du module d'Young entre ces deux types de sections. En second lieu, cette différence peut être due au logiciel qui, lors de la simulation, choisit des points de calculs différents d'une simulation à l'autre.

Le fait que la simulation donne des résultats plus élevés est dû au fait que seule la fibre élémentaire est modélisée, alors que lors des essais, c'est un amas de fibres qui subit les efforts dus à la traction. Pour le chanvre et pour le coco, c'est une fibre composée de fibres élémentaires. De fait, lors des tests de traction sur le chanvre et le coco, on peut considérer les échantillons comme étant un matériau composite. Ce matériau est composé de fibres élémentaires et de « vide », qui correspond à l'espace entre les fibres élémentaires. Les figures 3.2 et 3.6 montre, respectivement, cet espace pour les fibres de coco et les fibres de chanvre. Ainsi, en utilisant la loi des mélanges, équation 5.1 où la fraction volumique des fibres élémentaire est comprise entre 0 et 1, et où les propriétés mécaniques du vide sont nulles, on obtient :

$$E_{\text{fibre végétale}} = V_{\text{fibres élémentaires}} * E_{\text{fibres élémentaires}} \quad (5.1)$$

Ensuite, à la différence des fibres utilisées lors des essais, les modèles utilisés, considèrent que la fibre élémentaire est parfaite. En effet, dans les modèles mathématiques présentés dans le chapitre 5, les propriétés mécaniques des composants du chanvre et du coco sont inchangées et restent constantes tout le long de la fibre élémentaire. Ceci implique de meilleures propriétés mécaniques. Or en réalité, ces propriétés changent d'une fibre à l'autre, et varient sur la longueur de la fibre. C'est pour cela qu'il faudrait ajouter un coefficient d'endommagement compris entre 0 et 1, soit sur les valeurs des propriétés mécaniques des composants, soit sur les valeurs de module d'Young de la fibre par simulation. Ceci permettrait de compenser cela, et donc cela aurait pour conséquence de diminuer le module d'Young.



Tableau 5.2 Résultats du module d'Young de la fibre élémentaire moyennée de coco et de chanvre

		Valeurs du module d'Young obtenu par simulation (GPa)	Valeurs du module d'Young de Mme Ho Thi (GPa)
Fibre élémentaire de chanvre	Section circulaire	59,30	46,11
	Section elliptique	59,35	
Fibre élémentaire de coco	Section circulaire	6,12	3,56
	Section elliptique	6,36	

### 5.3 Variation du diamètre du lumen

Afin de confirmer notre modèle, une autre vérification avec l'étude de l'équipe de Placet (2012) a été faite. Cette étude consiste à voir l'influence de la taille du lumen sur le module d'Young. Les figures 5.2 et 5.3 montrent l'influence de la taille du lumen sur le module d'Young pour les fibres de chanvre et de coco ayant une section circulaire et elliptique. Les modèles utilisés pour cette étude ont un diamètre externe constant. C'est-à-dire, pour la fibre élémentaire de chanvre, un diamètre externe de 13  $\mu\text{m}$  pour le modèle avec une section circulaire et des dimensions externe de 15  $\mu\text{m}$  et 9  $\mu\text{m}$  pour le modèle avec une section elliptique. Pour la fibre élémentaire de coco, les dimensions des modèles ont un diamètre externe de 26  $\mu\text{m}$  pour la section circulaire et des dimensions de 32  $\mu\text{m}$  et 19  $\mu\text{m}$  pour le modèle avec une section elliptique. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de l'étude de Placet et de son équipe (2012). Ils montrent que quelle que soit la section de la fibre

élémentaire, ces résultats varient de la même façon : le module d'Young décroît quand le diamètre du lumen augmente et que l'épaisseur diminue.

La figure 5.4 montre l'écart du module d'Young entre les résultats obtenus avec une section circulaire et elliptique. Pour la fibre élémentaire de chanvre, l'écart entre ces deux sections augmente avec la grandeur du lumen, mais est très faible, il est inférieur à 1 %. Pour la fibre élémentaire de coco, ce constat reste similaire, mais l'écart augmente très fortement avec la taille du lumen. L'écart entre une fibre élémentaire circulaire et une fibre élémentaire elliptique peut atteindre plus de 30 % lorsque le lumen a de grande dimension par rapport à la taille de la fibre élémentaire.

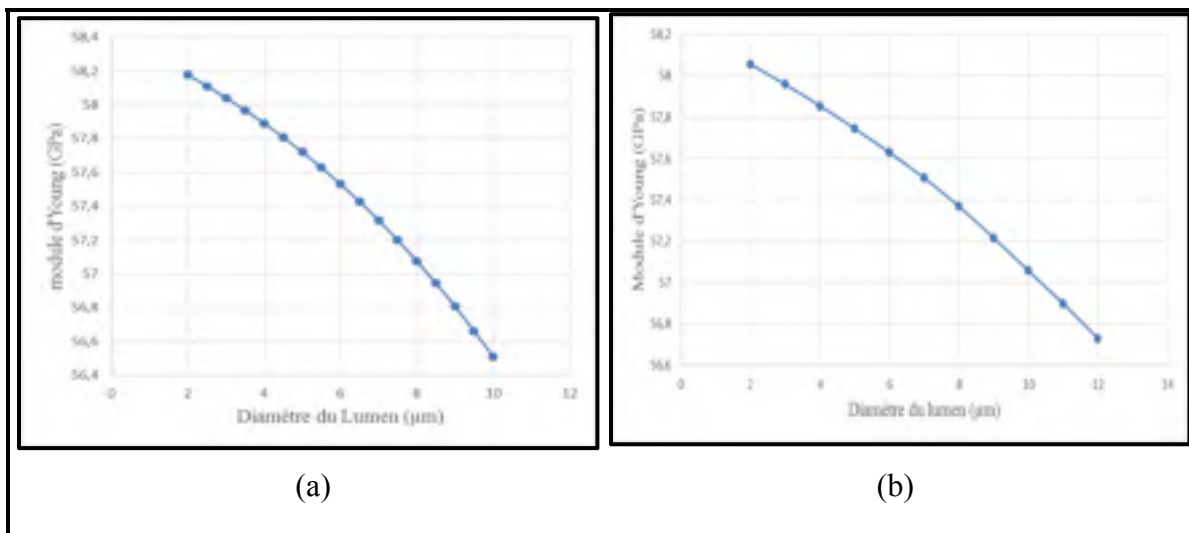


Figure 5.2 Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de chanvre suivant le diamètre du lumen pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

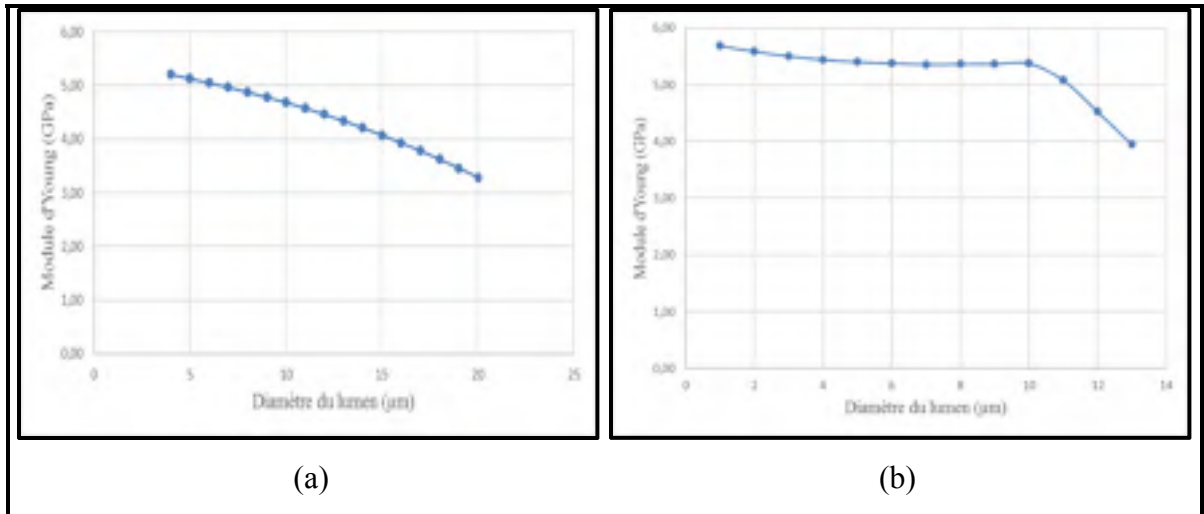


Figure 5.3 Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant le diamètre du lumen pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

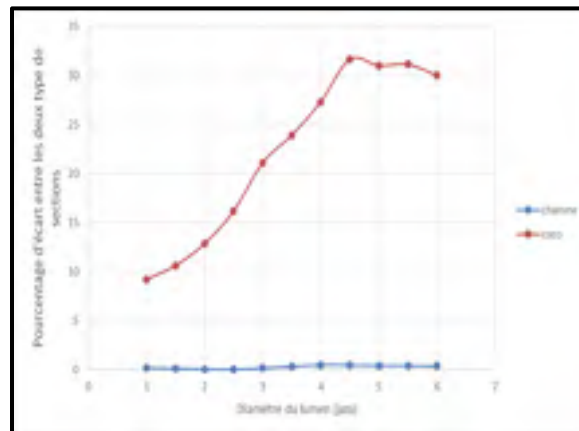


Figure 5.4 Pourcentage d'écart entre les valeurs obtenues pour une section circulaire et pour une section elliptique

#### **5.4 Variation de l'angle des microfibrilles**

Suite à cette variation du diamètre, l'étude qui est la plus fréquente quand il s'agit des fibres végétales est l'influence de l'angle des microfibrilles (AMF) sur le module d'Young. Comme indiqué dans le chapitre 1, les mesures de l'AMF de la couche S2 varient d'une étude à l'autre. Pour le chanvre, cette AMF varie de 7 à 11° dans la plupart des études, et les fibres de coco, il varie de 35 à 51°. Dans cette partie, une comparaison entre les valeurs du module d'Young obtenues avec une section circulaire et elliptique sera faite pour les deux types de fibres. En effet, l'influence de l'AMF a déjà été étudiée pour le chanvre (Placet, 2012). Et par similitude, les fibres de coco réagissent de la même façon. Plus l'angle AMF est grand, plus le module d'Young est faible. C'est l'une des raisons pour lesquelles les fibres de chanvre ont de meilleures propriétés mécaniques. En analysant les figures 5.5 et 5.6, le module d'Young réagit de la même façon, quelle que soit la morphologie de la section.

La figure 5.7 montre l'écart du module d'Young entre les résultats obtenus avec une section circulaire et elliptique. Pour la fibre élémentaire de chanvre, plus l'AMF est élevé, plus l'écart obtenu, entre les deux types de sections, est grand, la variation va de 2 à 12 %. Pour la fibre élémentaire de coco, ce constat reste similaire, même cet écart est plus important pour les AMF supérieurs à 40°. Cette écart va jusqu'à 18,5 %, quand l'AMF est égal à 60°.

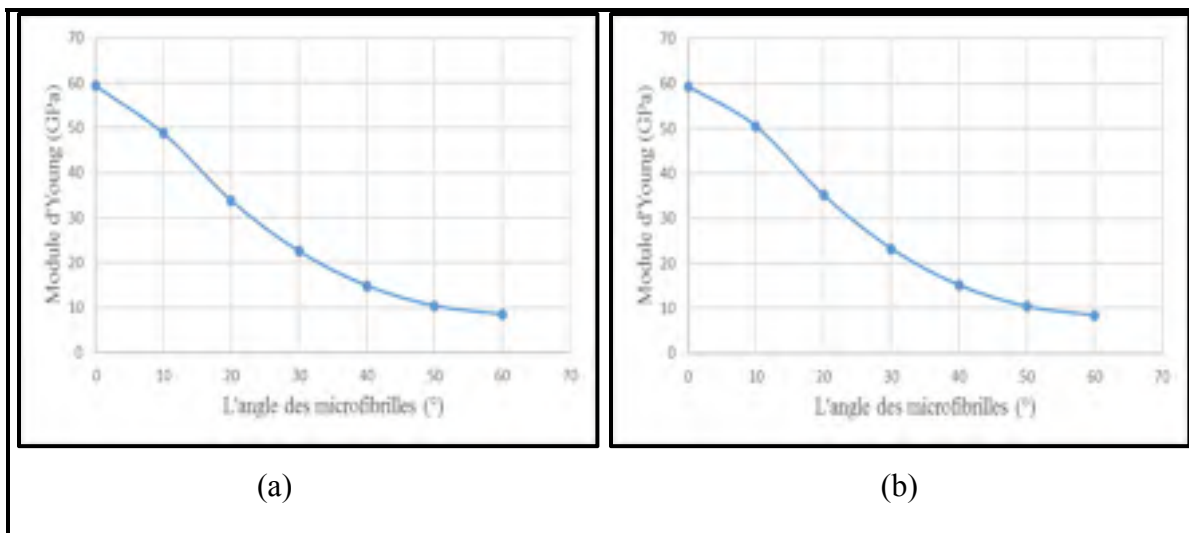


Figure 5.5 Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant l'AMF pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

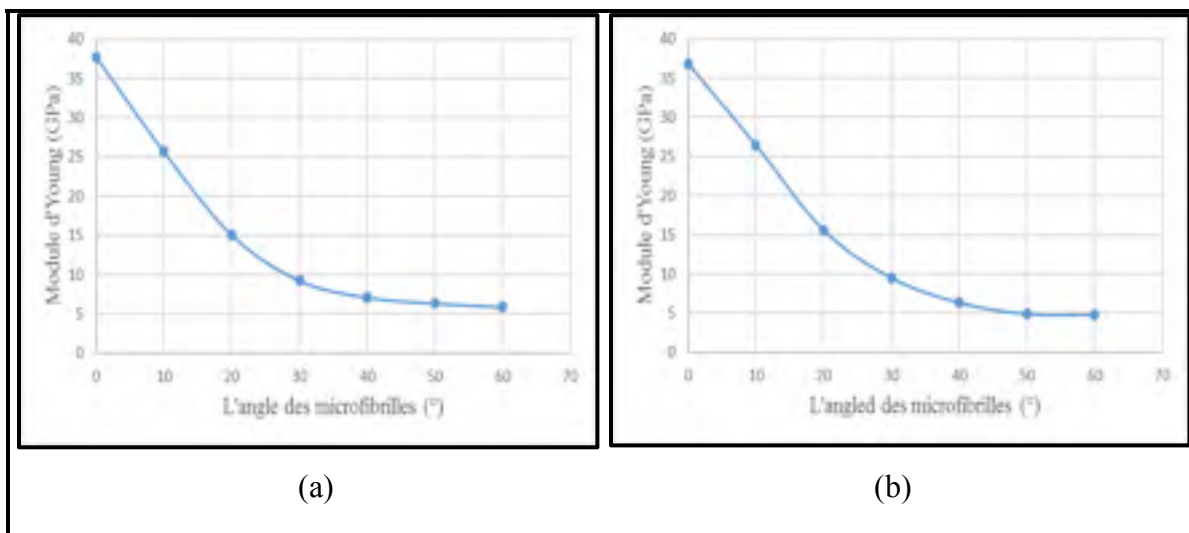


Figure 5.6 Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant l'AMF pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

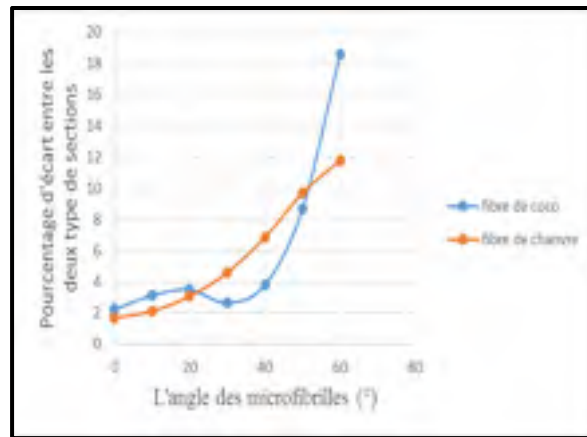


Figure 5.7 Pourcentage d'écart entre les valeurs obtenues pour une section circulaire et pour une section elliptique

### 5.5 Variation du diamètre avec une épaisseur constante de la paroi

Cette étude est la continuité de l'étude menée dans la partie 5.3. Dans cette partie, seule l'influence des dimensions du lumen et l'influence de l'épaisseur entrent en jeu. Contrairement à l'étude précédente, qui voit une diminution de l'épaisseur de la paroi quand les dimensions du lumen augmentaient, afin de garder constantes les dimensions externes de la fibre élémentaire. Pour les deux fibres et pour les deux types de sections, on retrouve la même variation du module d'Young. Plus la paroi est épaisse, plus le module d'Young de la fibre sera élevé. D'autre part, pour une même épaisseur, le module d'Young diminue avec la croissance du lumen (figure 5.8 et 5.9). Pour les figures 5.8b et 5.9b, où le module d'Young est en fonction du petit axe de l'ellipse, la relation entre le petit axe ( $b$ ) et le grand axe ( $a$ ) est de  $a = 2b$ .

Pour la fibre élémentaire de chanvre, l'écart entre les deux études est, comme pour les études précédentes, très faible, inférieur à 1 %. Pour la fibre élémentaire de coco, l'écart entre ces deux types de section est très élevé pour des dimensions du diamètre du lumen faible, entre 30 et 35 %, mais cet écart diminue quand les dimensions du lumen augmentent, il varie de 3 à 15 %.

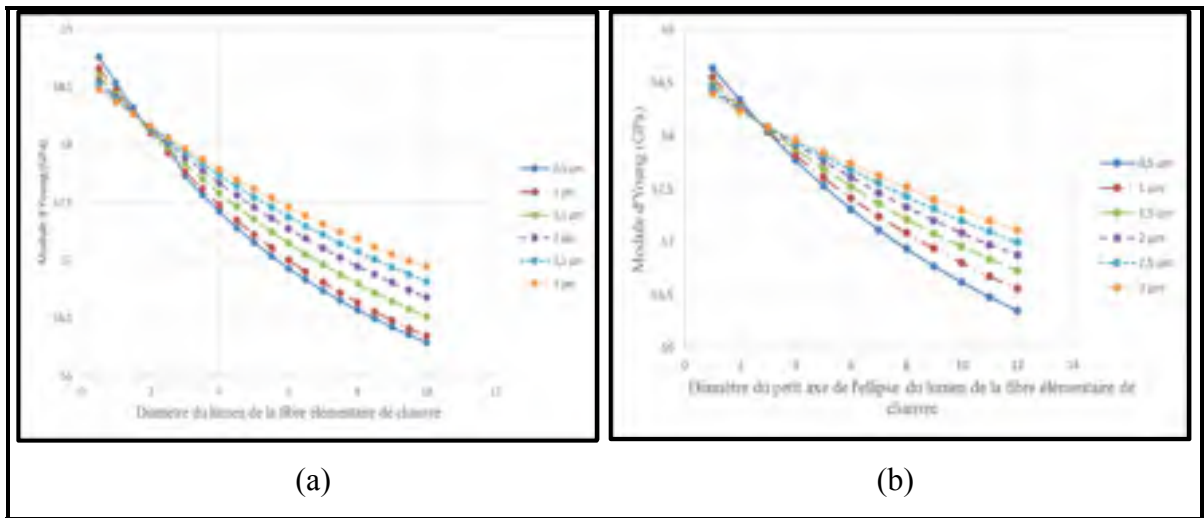


Figure 5.8 Variation du module d'Young suivant les dimensions du lumen avec différentes épaisseurs de la paroi de la fibre élémentaire de chanvre pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

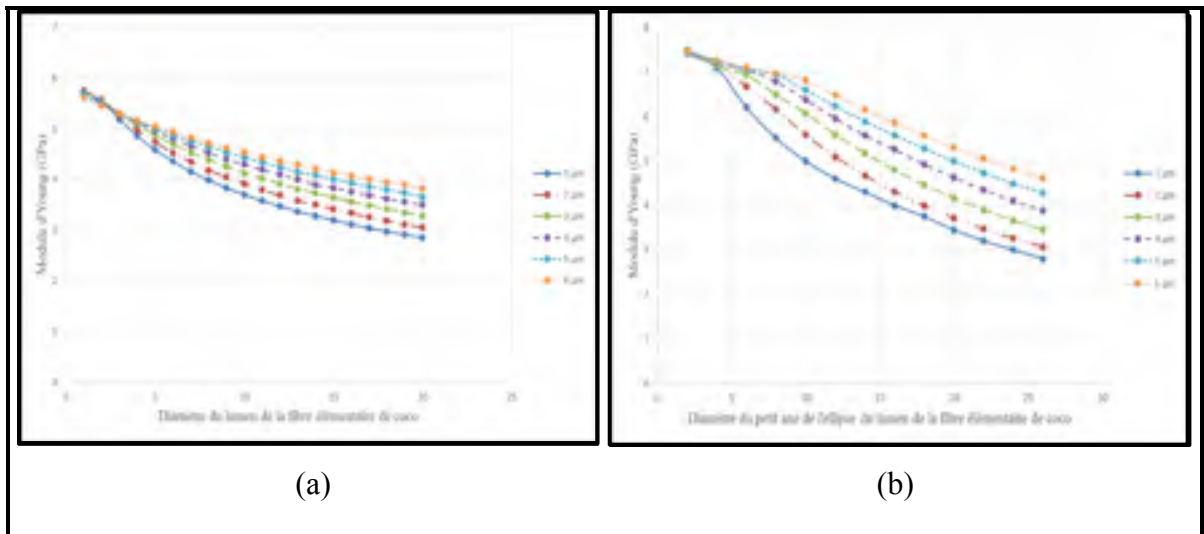


Figure 5.9 Variation du module d'Young suivant les dimensions du lumen avec différentes épaisseurs de la paroi de la fibre élémentaire de coco pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

## 5.6 Variation de la composition chimique

Le but de cette étude est de pouvoir se représenter, dans un cas particulier, quel pourcentage de cellulose cristalline se rapprochera si les fibrilles sont collées entre elles. En effet, au vu de ces propriétés mécaniques présenté dans les tableaux 1.2 du chapitre 1 et de son pourcentage assez aléatoire dans la cellulose : entre 54% et 88%, une variation de ce pourcentage pourrait engendrer une variation importante du module d'Young de la fibre élémentaire.

Le choix de poser comme hypothèse le fait que les fibrilles sont collées les unes aux autres est pour une modélisation plus réaliste de la fibre élémentaire. En effet, dans le cas où les fibrilles sont modélisées et incorporées dans la fibre élémentaire, il sera plus simple de faire en sorte que ces fibrilles modélisées soient en contact les unes des autres que de les placer aléatoirement dans la fibre élémentaire.

Pour cette étude, le pourcentage de cellulose cristalline, en fonction de l'arrangement des fibrilles dans les parois, sera analysé. En effet, il est compliqué de connaître avec certitude le pourcentage de cellulose cristalline dans les fibres végétales. Pour voir cette influence, les microfibrilles vont être considérées comme ayant un contact entre elles. Et comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, il a été précisé que la forme de la section des microfibrilles est cylindrique. On peut ainsi en déduire deux types d'arrangement présenté sur la figure 5.10. Pour cette partie, les deux types d'arrangement des fibrilles dans la paroi de la fibre végétale seront : un arrangement triangulaire (figure 5.10a) et un arrangement carré (figure 5.10b). Le but de cette recherche est de connaître quel est l'arrangement des fibrilles le plus fiable.

L'annexe IV permet de connaître la fraction volumique pour chacun des cas, c'est-à-dire, le pourcentage de la fibre dans l'arrangement choisi. Pour le modèle utilisé dans ce mémoire, on considère que les fibres se touchent. Ainsi, on se place dans le cas maximal, où  $e = 2 \cdot r$ . Les équations 5.2 et 5.3 donnent, respectivement les fractions volumiques maximales pour



l'arrangement triangulaire et carré. Ces valeurs permettront de prédire laquelle de ces deux arrangements se rapproche de la réalité.

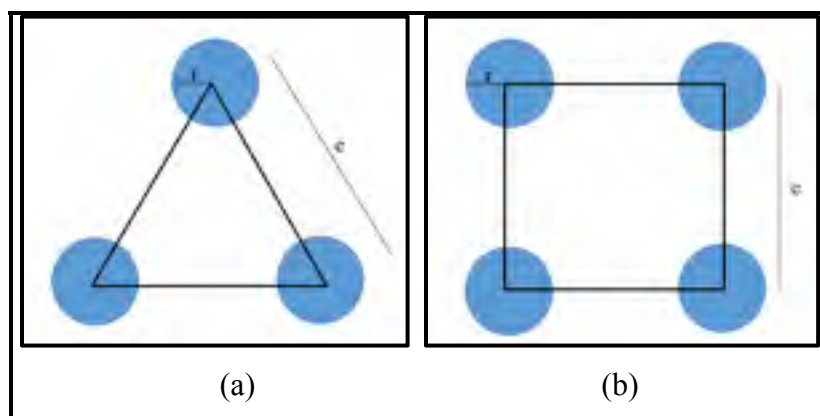


Figure 5.10 Différents types d'arrangement des microfibrilles : soit triangulaire (a) ou carré (b)

$$v_{ftrianglemax} = 0,907 \quad (5.2)$$

$$v_{fcarrémax} = 0,785 \quad (5.3)$$

Ainsi, en changeant le programme donné en annexe III, de nouveaux matériaux sont obtenus puis injectés dans le module *ACP*. Ces changements sont le pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose, et la fraction volumique de la cellulose et de la matrice : Pectine et hémicellulose. Dans cette étude, les autres composants des fibres végétales ne seront pas pris en compte. Les figures 5.11 et 5.12 montrent l'influence du pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose, dans le cas où les microfibrilles sont disposées selon les deux arrangements décrit précédemment, avec une fraction volumique de 0,907 et 0,785.

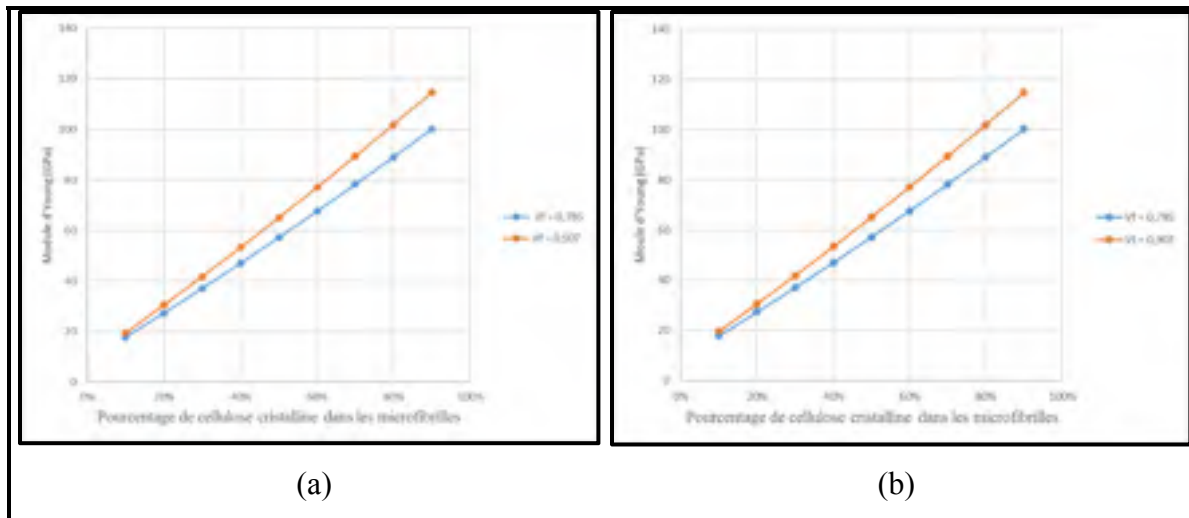


Figure 5.11 Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de chanvre suivant le pourcentage de cellulose cristalline pour un arrangement triangulaire des fibrilles dans la fibre pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

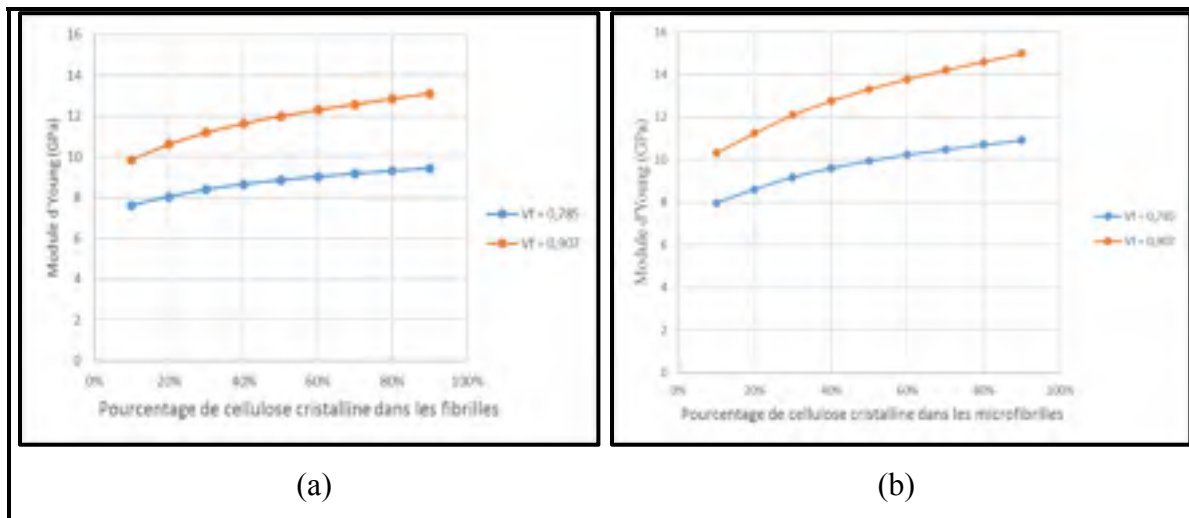


Figure 5.12 Variation du module d'Young de la fibre élémentaire de coco suivant le pourcentage de cellulose cristalline pour un arrangement triangulaire des fibrilles dans la fibre pour une section circulaire (a) et pour une section elliptique (b)

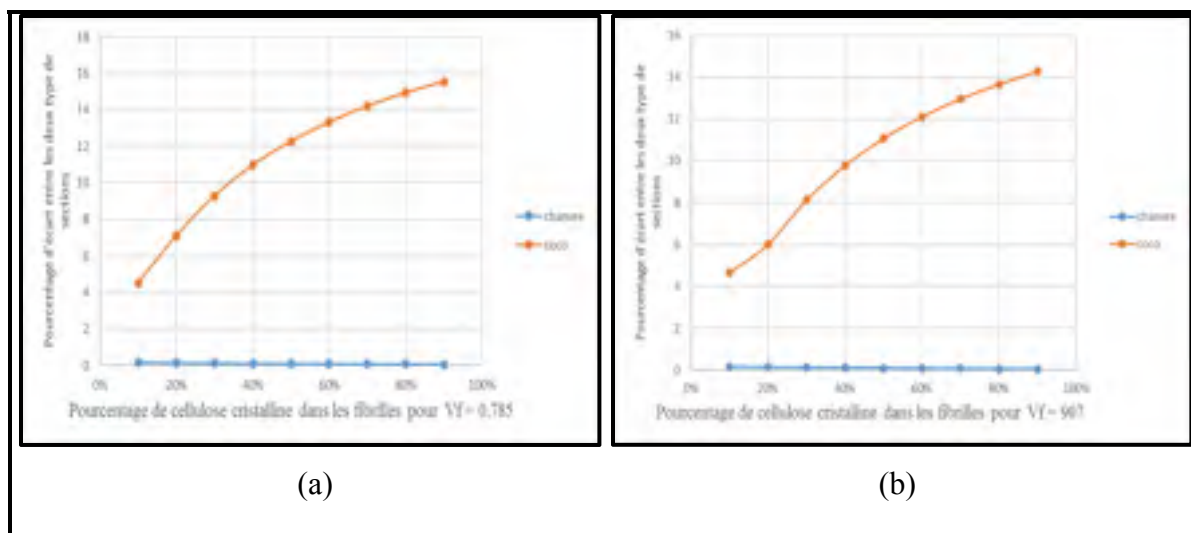


Figure 5.13 Pourcentage d'écart entre les valeurs obtenues pour une section circulaire et pour une section elliptique pour un  $V_f = 0,785$  (a) et pour un  $V_f = 0,907$  (b)

Cette étude permet de voir lequel entre les deux arrangements : triangulaire ou carré, correspond le mieux, en regardant le module d'Young, aux valeurs obtenues lors des essais donnés au paragraphe 6.1. Pour la fibre élémentaire de chanvre, en faisant varier le pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose des microfibrilles, le module d'Young varie de 17 à 120 GPa pour une section cylindrique ou elliptique, où la différence de valeur entre ces deux est faible, de l'ordre de 0,1 %. Pour l'arrangement des fibres dans la paroi, les deux types pourraient correspondre. En effet, pour ces deux arrangements triangulaire et carré, on obtient un module d'Young similaire à celui obtenu lors de la première modélisation pour un pourcentage respectivement d'environ 52 % et 47 % de cellulose cristalline. Ces deux valeurs entrent dans la plage donnée par Moon et al. (2011). Ainsi, ces deux arrangements pourraient correspondre à la réalité.

Pour le coco, les résultats sont différents. En effet, il est déjà possible de remarquer que la valeur du module d'Young varie entre 7,6 GPa et 15 GPa, avec un écart pouvant aller jusqu'à 15 %. On retrouve une même similitude que dans les cas précédents, avec un écart assez important entre la forme cylindrique et la forme elliptique pour la fibre de coco. Les valeurs obtenues lors de cette étude sont supérieures à celles obtenues lors de la première modélisation, où ces valeurs étaient de 6,12 GPa pour la section circulaire et 6,36 GPa pour

la section elliptique. Pour expliquer cette différence, plusieurs hypothèses peuvent être émises.

Premièrement, contrairement à la fibre de chanvre, le taux de cellulose assez faible, il est inférieur à 50%. Ainsi, quand on se place dans ces deux cas-là, c'est-à-dire avec un  $V_f$  de 0,785 et un  $V_f$  de 0,907, le taux de cellulose, donc le nombre de microfibrilles, dans la paroi a très nettement augmenté, engendrant une augmentation des propriétés mécaniques.

Deuxièmement, si les microfibrilles respectent l'un des deux arrangements cités ci-dessus, cela signifie, pour les fibres de coco, que les fibrilles ne se touchent pas. Il existerait un écart entre elles.

Troisièmement, si les microfibrilles respectent bien ces deux arrangements et qu'elles se touchent, cela signifierait que les fibrilles, qui sont composées uniquement de microfibrilles seraient espacées les unes des autres. En effet, vu que le module d'Young est plus élevé, cela signifie que le pourcentage de cellulose est trop élevé dans ce modèle. Ainsi, pour engendrer une diminution du module d'Young il faut donc diminuer le pourcentage de cellulose dans la paroi, pour cela, il faut que les fibrilles soient espacées dans la paroi.

## **5.7 Variation de l'épaisseur de la paroi sur une même fibre élémentaire**

L'objectif de cette étude sera d'observer le module d'Young d'une fibre élémentaire, ayant une section elliptique et dont le diamètre externe de la fibre aura une variation en fonction de sa longueur. Pour cela, la section du lumen restera constante tout le long de la fibre élémentaire contrairement à l'épaisseur de la paroi qui aura une variation fonction de la longueur de la fibre élémentaire. La particularité de réalisation de cette étude sera d'utiliser le module *Mechanical* d'ANSYS. En effet, comme indiqué dans le paragraphe 4.5.3, le module *ACP* ne peut pas être utilisé puisqu'il ne permet pas de faire varier l'épaisseur de la paroi. Ainsi, les modèles vont être créés en type « solide » et non en « corps surfaciques » (shell), ce qui permettra d'obtenir des résultats plus proches de la réalité et de les comparer avec les

résultats précédents. En effet, le module *ACP* va utiliser la théorie des plaques mince contrairement au module *Méchanical*.

Cette étude sera conduite en deux étapes : premièrement, une étude sera réalisée avec des modèles ayant une épaisseur constante, afin d'observer les différences entre le module *ACP* et le module *Mechanical*. Deuxièmement, une étude sera menée avec des modèles ayant une épaisseur qui varie le long de la fibre élémentaire. Cette seconde étude permettra de voir la différence entre une épaisseur constante et une épaisseur qui varie. Elle permettra également d'observer un comportement plus réaliste, étant donné que les fibres de chanvre et de coco n'ont pas une morphologie constante.

Pour le modèle de la fibre élémentaire de chanvre, les dimensions du lumen sont de 4  $\mu\text{m}$  pour le diamètre a et de 2  $\mu\text{m}$  pour le diamètre b. Pour les dimensions externes de la fibre élémentaire, il a été choisi de se référer à d'autres études pour voir l'ensemble de la variation de la fibre. En effet, contrairement à ce qui a été observé dans ce mémoire, les fibres de chanvre observées par d'autres chercheurs ont une paroi plus épaisse. C'est pour cela, que l'épaisseur va varier de 1  $\mu\text{m}$ , valeur obtenue grâce aux observations, jusqu'à 25  $\mu\text{m}$ , valeurs moyennées obtenues grâce aux données du tableau 5.1. Pour le modèle ayant une épaisseur constante, les dimensions du lumen resteront inchangées. L'épaisseur de la paroi sera quant à elle de 12  $\mu\text{m}$ . Cette valeur étant la valeur moyennée du modèle précédent.

Pour le modèle de la fibre élémentaire de coco, les dimensions du lumen sont de 10  $\mu\text{m}$  pour le diamètre a et de 8  $\mu\text{m}$  pour le diamètre b. Contrairement aux fibres élémentaires de chanvre, la paroi de la fibre élémentaire de coco est assez mince. En outre, au vu des observations réalisées par des chercheurs et celles effectuées dans ce mémoire, la variation de la paroi sera de 2  $\mu\text{m}$  à 6  $\mu\text{m}$ . Pour le modèle ayant une épaisseur constante, les dimensions du lumen resteront inchangées, et pour l'épaisseur de la paroi, elle sera de 3  $\mu\text{m}$ . Cette valeur étant la valeur moyennée du modèle précédent. Contrairement au module *ACP*, le module *Mechanical* d'ANSYS, ne permet pas de faire varier l'angle des microfibrilles.

Ainsi, à l'aide du programme MATLAB, donné en annexe VI, les propriétés mécaniques de la fibre élémentaire de coco sont obtenues pour un AMF égal à  $40^\circ$ .

Pour la création des modèles, la même longueur de 500  $\mu\text{m}$  a été adoptée. Pour la construction des modèles où on fait varier l'épaisseur, une grande ou une petite section sera entrée dans la géométrie de la fibre à une distance voulu afin de faire varier l'épaisseur. La grande section correspond à la plus grande épaisseur et la petite section correspond à la plus petite. Pour relier deux sections entre-elles, une variation linéaire a été choisie. Ceci a permis de créer deux modèles différents :

- Le premier modèle consistera à avoir une petite section au début, une grande section à 125  $\mu\text{m}$ , une petite section à 250  $\mu\text{m}$ , une grande section à 375  $\mu\text{m}$  et une petite section à 500  $\mu\text{m}$  (type II) ;
- Le deuxième modèle consistera à avoir une grande section au début, une petite section à 125  $\mu\text{m}$ , une grande section à 250  $\mu\text{m}$ , une petite section à 375  $\mu\text{m}$  et une grande section à 500  $\mu\text{m}$  (type III).

Après avoir utilisé les mêmes conditions de maillage que pour les études précédentes, une variation de 58 702 à 154 240 nœuds et de 9 766 et 28 521 éléments pour les modèles du chanvre et une variation de 47 255 à 164 604 nœuds et de 8 280 et 27 080 éléments pour les modèles du coco ont été obtenues pour les trois types de modèles. Les simulations ont été réalisées avec les mêmes conditions initiales, c'est-à-dire qu'un coté est fixe (encastrement) et qu'un déplacement de 5  $\mu\text{m}$  est imposé de l'autre côté.

### 5.7.1 Étude des modèles ayant une épaisseur constante

Les figures 5.14 et 5.16 montrent la variation des contraintes sur une fibre élémentaire de chanvre et sur une fibre élémentaire de coco, et les figures 5.15 et 5.17 celles des déformations. On peut constater que le module d'Young pour le modèle représentant la fibre élémentaire de chanvre est de 59,15 GPa, et qu'il est de 4,67 GPa pour le modèle représentant la fibre élémentaire de coco. On peut constater, par rapport aux résultats obtenus dans le paragraphe 5.2, que les résultats donnés sont plus faibles. On observe une diminution de 0,34 % pour le modèle représentant la fibre de chanvre et de 27 % pour modèle représentant la fibre de coco.

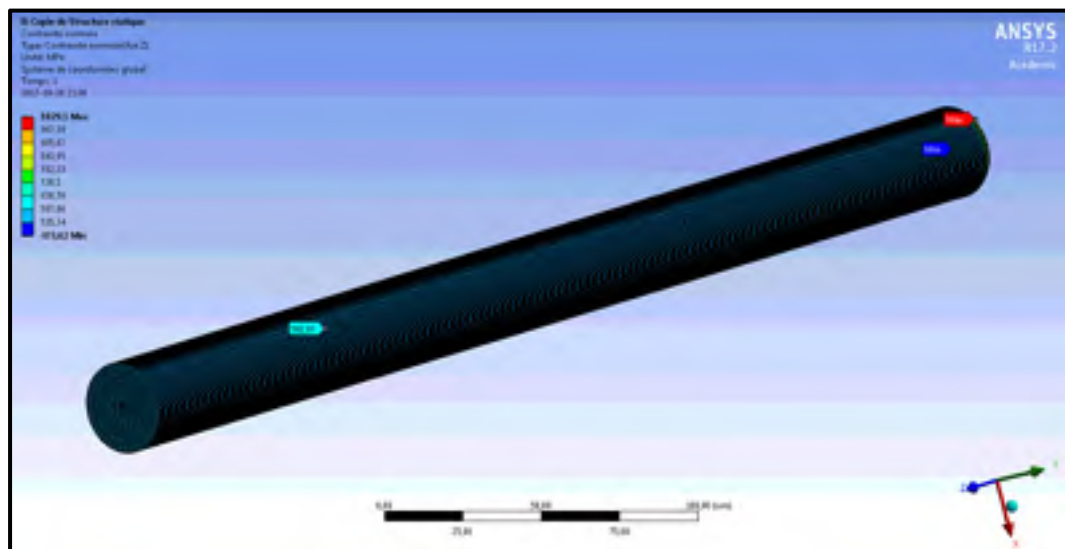


Figure 5.14 Contraintes dans la fibre élémentaire de chanvre ayant une épaisseur constante

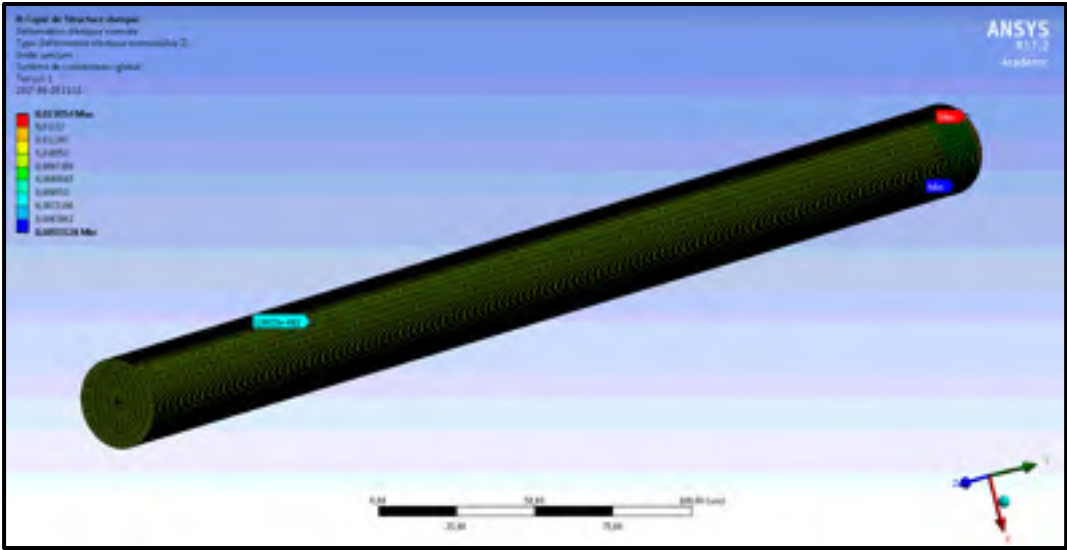


Figure 5.15 Déformations de la fibre élémentaire de chanvre ayant une épaisseur constante

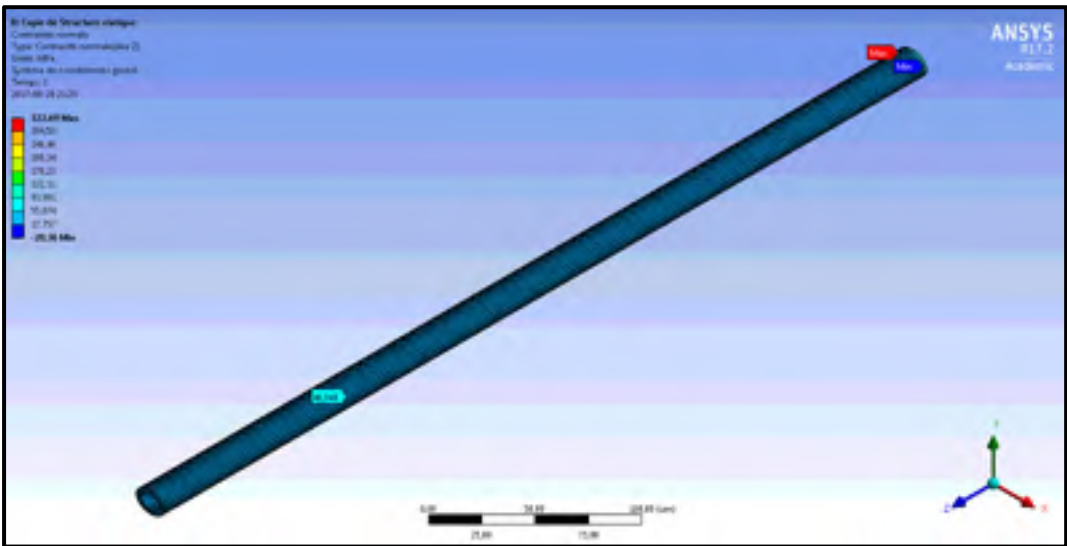


Figure 5.16 Contraintes dans la fibre élémentaire de coco ayant une épaisseur constante



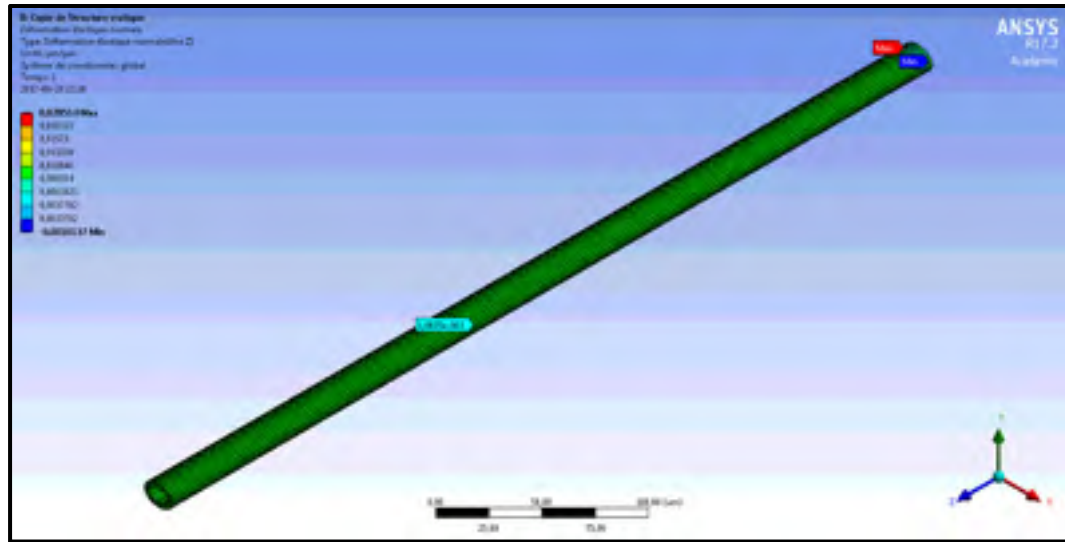


Figure 5.17 Déformations de la fibre élémentaire de coco ayant une épaisseur constante

### 5.7.2 Étude des modèles ayant une épaisseur qui varie

Les figures 5.18 et 5.20 montrent la variation des contraintes respectivement sur une fibre élémentaire de chanvre de type III et sur une fibre élémentaire de coco de types II. De la même manière, les figures 5.19 et 5.21 montrent les déformations respectivement sur une fibre élémentaire de chanvre de type III et sur une fibre élémentaire de coco de types II. Le tableau 5.3 donne les valeurs des modules d'Young pour les deux fibres végétales. On peut voir les conséquences de la variation des fibres végétales. En effet, les propriétés mécaniques varient le long de la fibre élémentaire. Pour celle du chanvre, la variation du module d'Young pour une épaisseur de la paroi allant de 1  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$  est de 15,19 %. Pour celle du coco, la variation du module d'Young pour une épaisseur de la paroi allant de 1  $\mu\text{m}$  à 6  $\mu\text{m}$  est de 3,93 %.

On peut observer la variation des contraintes suivant la longueur grâce à ces modèles. Ces variations entraînent une différence de comportement de la fibre élémentaire lors d'un essai en traction. En effet, le risque de brisure sera d'autant plus élevé que les contraintes seront maximales. En observant les figures ci-dessous (5.18 et 5.20), on constate que les zones où l'épaisseur est la plus faible constituent des zones de fragilité de la fibre élémentaire. Cette

fragilité peut être observée en appliquant un critère de rupture, tel que celui des contraintes maximal. Le logiciel *Mechanical* pourra ainsi montrer la zone où les fibres élémentaires briseront en premier en se basant sur la valeur des contraintes.

Pour connaître le module d'Young des fibres élémentaires, ayant une épaisseur qui varie, il faut se référer aux normes qui sont appliquées dans ce cas. On constate que la connaissance de la contrainte va se baser sur la section moyennée de la fibre à laquelle on applique une force, qui est constante le long de la fibre (équation 5.2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.2)$$

Pour appliquer ce principe aux derniers modèles, on remarque bien la variation des contraintes sur les modèles du type II et III, qui est en accord avec ce qui a été dit précédemment. En se basant sur l'équation 5.3, qui est la compilation des équations 4.23 et 5.2, on peut avoir une idée sur la valeur du module d'Young de la fibre élémentaire. En effet, les figures 5.19 et 5.21 montrent que plus la section de la fibre sera faible, plus la déformation qui es appliquée sera importante, et inversement, plus la section est grande, plus la déformation est faible. Ainsi, en combinant ces résultats, on peut en déduire, que le module d'Young restera similaire, même s'il y a une variation de la section.

$$E = \frac{F/A}{\varepsilon} \quad (5.3)$$

On peut ainsi en conclure que le module *Mechanical* permet effectivement de faire varier la section de la fibre. Cela permet d'observer la variation des contraintes et des déformations. Cependant, bien qu'une variation des contraintes suivant la longueur de la fibre existe, cette variation reste assez faible, inférieure à 15 % pour une différence de diamètre allant de 4  $\mu\text{m}$  à 42  $\mu\text{m}$ . Ainsi, l'utilisation du module d'*ACP*, et le fait de construire des modèles de fibres végétales ayant une section constante peut convenir à l'obtention du module d'Young, surtout au vu des hypothèses faites sur les propriétés mécaniques de ces fibres.

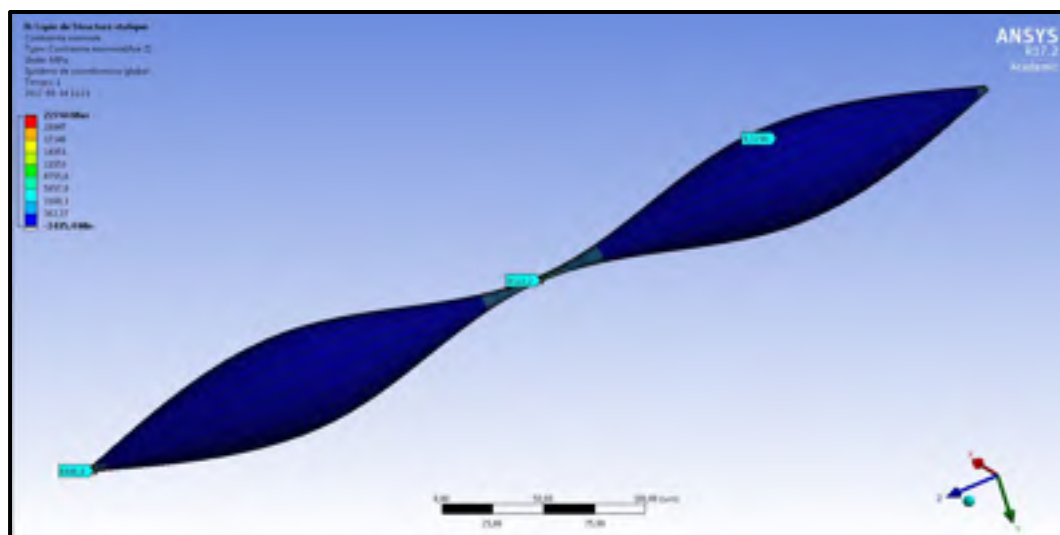


Figure 5.18 Contrainte dans la fibre élémentaire de chanvre du type III

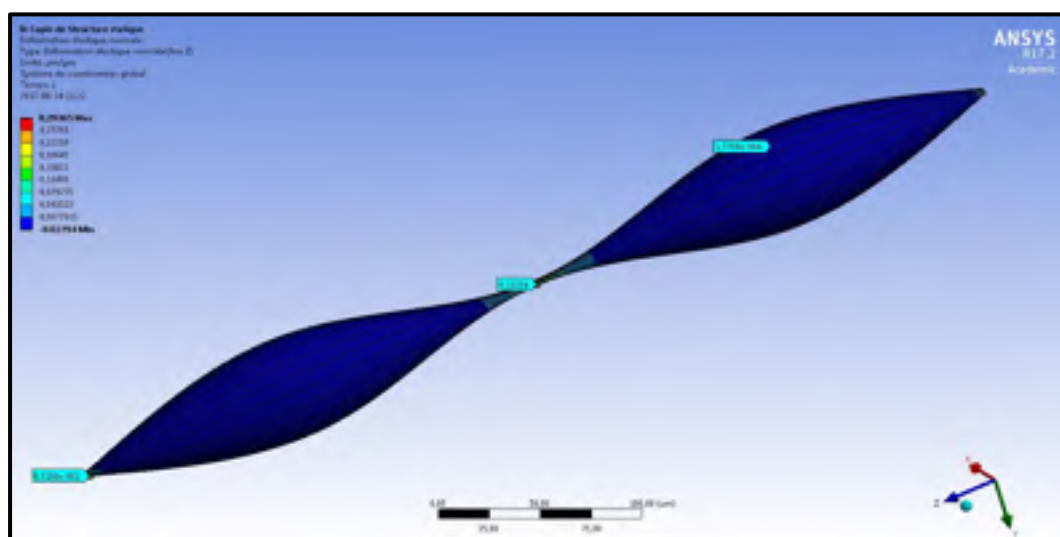


Figure 5.19 Déformation de la fibre élémentaire de chanvre du type III

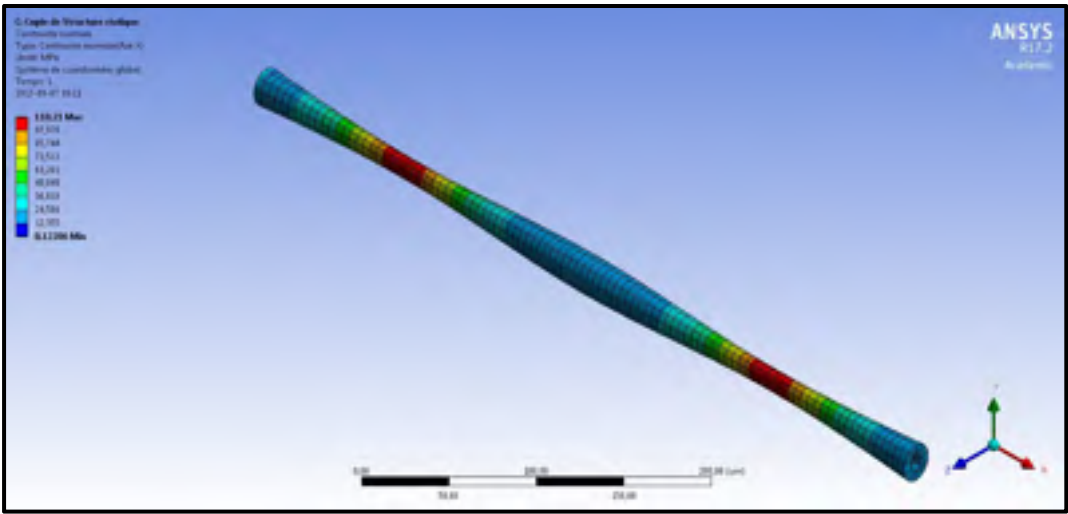


Figure 5.20 Contrainte dans la fibre élémentaire de coco du type II

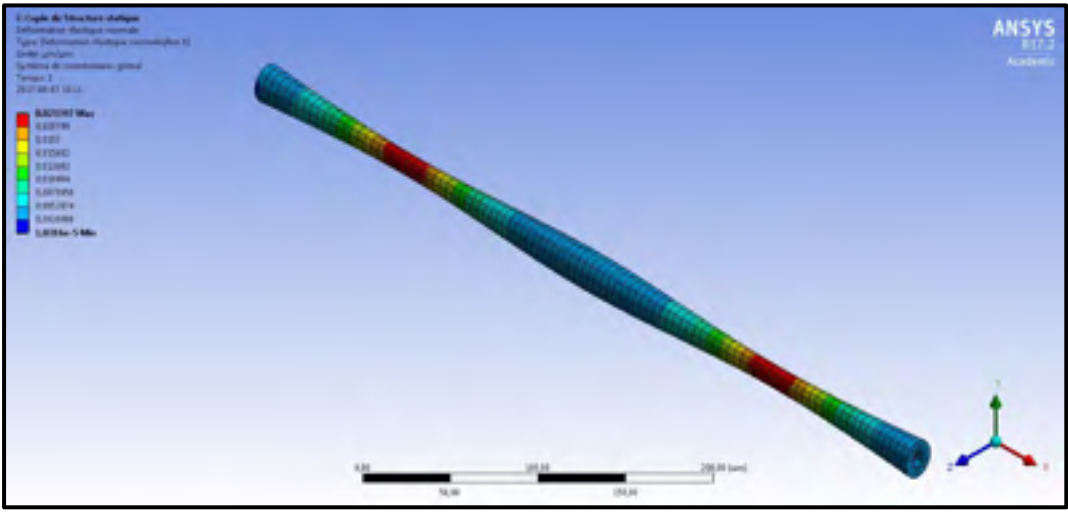


Figure 5.21 Déformation de la fibre élémentaire de coco du type II

Tableau 5.3 Module d'Young pour les fibres élémentaires de chanvre et de coco suivant les cinq types de modèles

	Module d'Young pour la fibre élémentaire de chanvre (GPa)		Module d'Young pour la fibre élémentaire de coco (GPa)	
	Petite section	Grande section	Petite section	Grande section
Type II	60,95	51,27	4,93	4,64
Type III	60,68	51,89	4,73	4,64
Moyenne	$60,82 \pm 0,14$	$51,58 \pm 0,31$	$4,83 \pm 0,10$	$4,64 \pm 0,0$
Écart entre les modules d'Young (%)	15,19		3,93	

## 5.8 Prédiction du module d'Young des fibres de chanvre et de coco

Lors du chapitre 4, les observations des fibres de coco, comme celles de chanvre, ont montré qu'elles étaient composées des fibres élémentaires. Ainsi, pour connaître le module d'Young de la fibre de coco et celle de chanvre, il faut connaître la fraction volumique des fibres élémentaires dans la fibre végétale, et avec l'équation 6.1, il sera possible de prévoir celui de la fibre. Les arrangements vus dans la partie 6.5 peuvent être utilisés. La fraction volumique pour des fibres circulaires est de 0,907 pour un arrangement triangulaire, 0,785 pour un arrangement carré et 0,685 pour un arrangement pentagonal (annexe IV).



## CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était d'investiguer l'influence de la morphologie et de la composition chimique sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco. Dans le but d'atteindre cet objectif, deux études ont été menées :

- L'observation de la morphologie des fibres de chanvre et de coco
- La création de modèles numériques pour estimer le module d'Young suivant plusieurs critères : morphologie de la fibre, composition chimique.

À la suite des observations, une similitude entre les fibres de chanvre et celles de coco a pu être établie. En effet, ces deux fibres sont composées de fibres élémentaires. Pour les fibres de coco, cette observation a déjà été réalisée. Pour les fibres de chanvre cette observation est nouvelle. En effet, étant donné que la fibre de chanvre est une fibre libérienne les fibres sont directement prélevées sur la tige. Cela qui signifie que les fibres de chanvre devraient être unitaires. Cependant, en comparant les dimensions des fibres observées avec celles utilisées dans d'autres études, il a été observé que les fibres utilisées dans ce mémoire avaient des dimensions plus faibles. Ceci est en réalité dû à l'endroit où ces fibres ont été prélevées dans la tige de la plante.

La fibrillation est à l'origine du fait que les fibres sont elles-mêmes composées de plusieurs fibres élémentaires. Cette dernière étape qui sert au démêlement des fibres libériennes, n'était pas assez performante pour les séparer toutes les fibres de la tige et plus particulièrement les plus petites. Ceci a permis d'obtenir des fibres de chanvre, composées des plusieurs petites fibres, ayant des dimensions plus grandes.

À la suite de cela, le choix des modèles numériques a été de modéliser les fibres élémentaires de coco et de chanvre. La raison de ce choix est qu'il est plus simple d'étudier l'influence de paramètres sur une fibre unitaire, que sur un ensemble de fibres. Plusieurs modèles ont ainsi été créés afin d'étudier les variations du module d'Young en fonction des dimensions de la

section transversale des fibres élémentaires : dimensions du lumen, épaisseur de la paroi et la composition chimique. Avec les résultats obtenus, il est possible de voir quels sont les paramètres qui influencent le plus le module d'Young de la fibre élémentaire.

Entre les deux types de paramètres choisis : soit la composition chimique, soit la morphologie, c'est la composition chimique qui influence le plus la valeur du module d'Young. Et en particulier l'AMF, où pour une variation de  $\pm 10^\circ$  autour de l'AMF obtenue expérimentalement pour le chanvre, on a une variation de  $\pm 12,5$  GPa, et avec cette même variation angulaire autour de  $35^\circ$ , on a une variation de  $\pm 3.8$  GPa. Ensuite, il vient le pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose qui compose les microfibrilles.

S'agissant de l'influence de la morphologie de la section transversale, le fait qu'elle soit elliptique va augmenter son module d'Young, lors d'un essai en traction. Pour les dimensions de la fibre, le module d'Young sera le plus élevé avec un lumen faible devant l'épaisseur de la fibre élémentaire, et il sera plus faible avec un lumen de grande dimensions et une paroi mince.

Une autre étude a été menée, qui consiste à connaître l'arrangement des microfibrilles dans la paroi de la fibre élémentaire. Cette étude a permis de montrer que, pour les fibres de chanvre, les microfibrilles peuvent être en contact les unes des autres, alors que pour les fibres de coco, il y a de forte chance que les microfibrilles soient espacées dans la paroi de la fibre.

Une dernière étude a été menée sur la variation de l'épaisseur sur une même fibre élémentaire. Cette étude a permis de voir que la variation de l'épaisseur la paroi des fibres élémentaires végétales entraîne une variation importante du module d'Young.



## **RECOMMANDATIONS**

À la suite de cette recherche, les différents travaux expérimentaux et théoriques qui pourraient compléter cette recherche sont :

- Observation de l'arrangement des fibrilles et des microfibrilles dans une fibre élémentaire.
- Modélisation d'une fibre végétale avec ces fibres élémentaires.
- Validation des résultats obtenus.



## ANNEXE I

### CARACTÉRISTIQUES DE LA RÉSINE WC-575



**ALIPHATIC & WATER CLEAR URETHANES**

"Industry's MOST VERSATILE, SAFEST, and EASIEST TO USE"

### WC-575 A/B WATER CLEAR SHORE 70 A POLYURETHANE ELASTOMER



WC-575 A/B is a two-part, clear, colorless aliphatic-based polyurethane elastomer. It is recommended for use whenever a flexible, permanently transparent elastomer is required. It is UV light and oxidation resistant and can be easily tinted or pigmented to clear bright colors.

WC-575 A/B does not contain MOCA, TDI, or MDA. In addition to being an excellent castable product, it also functions well as an adhesive for bonding various substrates.

PHYSICAL PROPERTIES	TEST METHOD	RESULTS
Hardness, Shore A	ASTM D2240	70 ± 5
Density (g/cc)	ASTM D792	1.05
Cubic Inches per Pound	N/A	26.2
Color/Appearance	Visual	Colorless/Clear
Tensile Strength (psi)	ASTM D412	1,370
Elongation (%)	ASTM D412	300
Tear Strength (pli)	ASTM D624	66
Shrinkage (in/in) linear	ASTM D2568	0.008

HANDLING PROPERTIES	Part A	Part B
Mix Ratio by weight	100	90
Mix Ratio by volume	100	94
Specific Gravity @ 77°F (25°C)	1.07	1.03
Color	Colorless	Colorless
Viscosity (cps) @ 77°F (25°C) Brookfield	4,725	300
Mixed Viscosity (cps) @ 77°F (25°C) Brookfield	1,050	
Work Time, 100g mass @ 77°F (25°C)	15 minutes	
Gel Time	25 minutes	
Demold Time @ 77°F (25°C)	8 hours, 1/4" thick; 4 hours in larger mass	

Properties above are typical and not for specifications.

Quality Management  
System Registered  
# 100-4301-0008

WC-575 A/B Page 1 of 2  
For more information call BJB Enterprises, Inc. (714) 734-6410 Fax (714) 734-6029  
www.bjben enterprises.com

Draw: 02/06/2015

#### CURE SCHEDULE/HEAT CURING

Most of the physical properties can be achieved in 5-7 days at 77°F (25°C). You may use your own post-cure schedule but the physical properties may vary from BJB's cure schedule of 1-3 hours at 77°F (25°C) followed by 16 hours at 160°F (71°C). Do not exceed curing temperatures of 200°F (93°C). Support of the part may be required to prevent part deformation during the heat curing process.

If you are using heat to accelerate the demold time, allow the part to cool down to ambient temperature before demolding.

**NOTE:**

**NOTE:**  
The cure will be inhibited if cast against a tin catalyzed silicone RTV.

#### STORAGE AND HANDLING:

Store at ambient temperatures: 65-80°F (18-27°C). Unopened containers will have a shelf life of 6 months from date of shipment when properly stored at recommended temperatures. Purge opened containers with dry nitrogen before re-sealing.

PACKAGING	Part A	Part B	Cubic Inches per Kit
Gallon Kits	8 lbs.	7.2 lbs.	306.2
5-Gallon Kits	40 lbs.	36 lbs.	1,091.2
55-Gallon Drum Kits	400 lbs.	360 lbs.	10,912

### SAFETY PRECAUTIONS:

Avoid contact with skin using protective gloves and protective clothing. Repeated or prolonged contact on the skin may cause an allergic reaction. Eye protection is extremely important. Always use approved safety glasses or goggles when handling this product. Use in well-ventilated areas. Avoid breathing vapors. If exposures cannot be kept at a minimum, a respirator may be necessary in addition to ventilation. The use of a positive pressure air supplied respirator is mandatory when airborne isocyanate concentrations are "not known" or exceeds OSHA TWA of 0.005 ppm. Air purifying organic cartridge type respirators are not generally recommended to use when handling this material without implementation of an end of life service program. Observe OSHA regulations for respirator use (29 CFR 1910.134). Employers are responsible for selecting the correct respirator for each situation.

**IF CONTACT OCCURS:**

<b>Skin:</b>	Immediately wash with soap and water. Remove contaminated clothing and launder before reuse. It is not recommended to remove resin from skin with solvents. Solvents only increase contact and dry skin. Seek qualified medical attention if allergic reactions occur.
<b>Eyes:</b>	Immediately flush with water for at least 15 minutes. Call a physician.
<b>Ingestion:</b>	If swallowed, call a physician immediately. Remove stomach contents by gastric suction or induce vomiting only as directed by medical personnel. Never give anything by mouth to an unconscious person.

Refer to the Material Safety Data Sheet before using this product.



Handling Guide



WC-575 Part A SDS



WC-575 Part B SOS

Quality Management  
System Required  
under 2010 contract

WC-575 AB Page 2 of 2

Date: 02/06/2017

For more information call 878-8800000, fax (714) 714-8410, Fax (714) 714-8036

[illegible]

## ANNEXE II

### PARAMÈTRES DE DÉCOUPES DES FIBRES AU LASER

```
tool[12].name=Fibercut2
mode=1
type=12
scanner_type=1
deleted=0
nof_tasks=1
version=1
task=0
enabled=1
repeat_count=15
repeat_delay=0
SL10DP_air_pressure=0
SL10DP_power=0.8
SL10DP_current=54
SL10DP_frequency=120000
SL10DP_focus_offset=0
SL10DP_beam_diam=10
rtc2_yag_jump_delay=1000
rtc2_yag_mark_delay=600
rtc2_yag_poly_delay=10
rtc2_yag_laser_off_delay=100
rtc2_yag_laser_on_delay=10
rtc2_yag_mark_speed=50
rtc2_yag_jump_speed=50
hole_type=1
hole_overlap=0
```

```
hole_inn_diam=0
hole_diam_factor=1
hole_nof_turns=5
hole_outwards=0
move_add_start_moves=0
move_add_end_moves=0
move_start_move_type=0
move_end_move_type=0
move_start_move_length=0.05
move_end_move_length=0.05
wobble_enabled=0
wobble_amplitude=20
wobble_frequency=2500
;AmplitudeDistance=20
;Categories=1
;Categories=1
;Categories=1
;Categories=0
;Categories=0
;Categories=1
;Categories=1
```

## ANNEXE III

### PROGRAMME MATLAB

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Thomas LEPLANOIS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Propriétés mécaniques de la fibre végétale %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Initialisation
clear all;
close;
clc;

%% Paramètres physiques

% Propriétés mécaniques de la cellulose cristalline (MPa)
Elcc = 140000;
Etcc = 27200;
Gltcc = 4400;
NUltcc = 0.1;
dcc = 1.6;

% Propriétés mécaniques de la cellulose amorphe (MPa)
Eac = 9000;
Gac = 4300;
NUac = 0.23;
dac = 1.42;

% Propriétés mécaniques de l'hémicellulose (MPa)
Elhc = 7500;
Ethc = 3750;
Glthc = 1750;
NUltc = 0.2;
dhc = 1.4;

% Propriétés mécaniques de la lignine
Elg = 3000;
Glg = 760;
NULg = 0.3;
dlg = 1.4;

%% Composition des fibrilles pour la fibre de chanvre
% Fraction massique de la cellulose
Mc = 0.70;
% Pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose
Pcc = 0.60;
% Pourcentage de cellulose amorphe dans la cellulose
```

```

Pac = 1-Pcc;
% Fraction massique de la cellulose
Mcc = Mc*Pcc;
% Faction massique de la cellulose
Mac = Mc*Pac;
% Faction massique de l'hémicellulose
Mhc = 0.15;
% Faction massique de la lignine
Mlg = 0.04;
% Faction massique de la matrice
Mhlg = Mhc + Mlg;
% Pourcentage de l'hémicellulose amorphe dans la matrice
Phc = Mhc*1/Mhlg;
% Pourcentage de la lignine amorphe dans la matrice
Plg = Mlg*1/Mhlg;

% %% Composition des fibrilles pour la fibre de coco
% % Fraction massique de la cellulose
% Mc = 0.43;
% % Pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose
% Pcc = 0.60;
% % Pourcentage de cellulose amorphe dans la cellulose
% Pac = 1-Pcc;
% % Fraction massique de la cellulose
% Mcc = Mc*Pcc;
% % Faction massique de la cellulose
% Mac = Mc*Pac;
% % Faction massique de l'hémicellulose
% Mhc = 0.002;
% % Faction massique de la lignine
% Mlg = 0.54;
% % Faction massique de la matrice
% Mhlg = Mhc + Mlg;
% % Pourcentage de l'hémicellulose amorphe dans la matrice
% Phc = Mhc*1/Mhlg;
% % Pourcentage de la lignine amorphe dans la matrice
% Plg = Mlg*1/Mhlg;

%% Masse volumique des fibrilles, de la matrice et de la fibre élémentaire
dc = dcc*Mcc/Mc + dac*Mac/Mc;
dhlg = dhc*Mhc/Mhlg + dlglg*Mlg/Mhlg;
dcom = (Mc/(Mhlg+Mc))*dc + (Mhlg/(Mhlg+Mc))*dhlg;

% Fraction volumique de la cellulose cristalline
Vcc = (dc/dcc)*(Mcc*1)/Mc;
% Fraction volumique de la cellulose amorphe
Vac = (dc/dac)*(Mac*1)/Mc;
% Fraction volumique de l'hémicellulose
Vhc = (dhlg/dhc)*(Mhc*1)/Mhlg;
% Fraction volumique de la lignine
Vlg = (dhlg/dlglg)*(Mlg*1)/Mhlg;

% La fraction volumique de la cellulose
Vf = (dcom/dc)*Mc;

```



```

% Vf = 0.785;           % Pour un arrangement triangulaire
% Vf = 0.907;           % Pour un arrangement carré

% La fraction volumique de la matrice
Vhlg = (dcom/dhlg)*Mhlg;
Vmat = Vhlg;
% Vmat = 1 - Vf;        % Pour un arrangement triangulaire ou carré

%% Propriétés mécaniques des microfibrilles celluloses
Elf = Vcc*Elcc + Vac*Eac;
Etf = 1/(Vcc/(Etcc) + Vac/Eac);
Gltf = 1/(Vcc/Gltcc + Vac/Gac);
NUltf = Vcc*NUltcc + Vac*NUac;
NUltf = NUltf*(Etf/Elf);

%% Propriétés mécaniques des autres constituants (ou les pectines
% et les extractibles sont ignorés)
Elmat = Vhc*Elhc + Vlg*Elg;
Etmat = 1/(Vhc/Ethc + Vlg/Elg);
Gmat = 1/(Vhc/Glthc + Vlg/Glg);
NUmat = Vhc*NUlthc + Vlg*NUlg;
NUltmat = NUmat*(Etmat/Elmat);

% Propriétés mécaniques de la fibre
% Le module d'élasticité suivant l'axe longitudinal
El = Vf*Elf + Vmat*Elmat;
fprintf('Le module d'élasticité suivant l'axe longitudinal :\n')
fprintf('El = %f',El)
fprintf(' MPa\n\n')
%-----
-
% Le module d'élasticité suivant l'axe transversal
Et = ((Etf*Etmat)/(Etmat+Etf*(1-sqrt(Vf))/sqrt(Vf))) + (1-sqrt(Vf))*Etmat;
fprintf('Le module d'élasticité suivant l'axe transversal :\n')
fprintf('Et = %f',Et)
fprintf(' MPa\n\n')
%-----
-
% Le module de cisaillement suivant l'axe de référence -
Gxy(E1,E2,NU12,G12,theta)
Glt = 1/(Vf/Gltf + (Vmat/Gmat));
fprintf('Le module de cisaillement suivant l'axe de référence:\n')
fprintf('Glt = %f',Glt)
fprintf(' MPa\n\n')
%-----
-
% Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence -
NUxy(E1,E2,NU12,G12,theta)
NUlt = Vf*NUltf + Vmat*NUmat;
fprintf('Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence:\n')
fprintf('NUlt = %f',NUlt)
fprintf('\n\n')
%-----
-

```

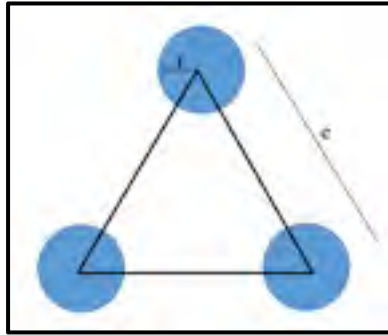
```
% Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence -
NUyx(E1,E2,NU21,G12,theta)
NUt1 = NUlt*(Et/E1);
fprintf('Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence:\n')
fprintf('NUt1 = %f',NUt1)
fprintf('\n\n')
%-----
```

## ANNEXE IV

### FRACTION VOLUMIQUE SUIVANT TROIS TYPES D'ARRANGEMENT POUR UNE GÉOMÉTRIE AYANT UNE SECTION CIRCULAIRE

Dans cette annexe, la fraction volumique sera calculée selon trois types d'arrangement : triangulaire, carré et pentagonal.

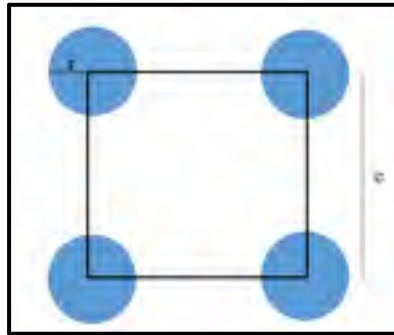
- Arrangement triangulaire



$$v_{ftriangle} = \frac{\frac{1}{6} * (\pi * r^2) * 3}{\frac{\sqrt{3}}{4} * e^2} = \frac{4 * \pi}{2 * \sqrt{3}} * \left(\frac{r}{e}\right)^2 \quad (\text{II.1})$$

$$v_{ftrianglemax} = \frac{4 * \pi}{2 * \sqrt{3}} * \left(\frac{e}{2 * e}\right)^2 = 0,907 \quad (\text{II.2})$$

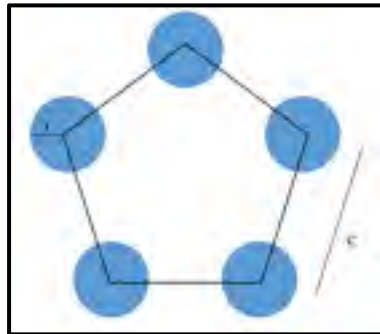
- Arrangement carré



$$v_{fcarrée} = \frac{\frac{1}{4} * (\pi * r^2) * 4}{e^2} = \pi * \left(\frac{r}{e}\right)^2 \quad (\text{II.3})$$

$$v_{fcarréemax} = \pi * \left(\frac{e}{2 * e}\right)^2 = 0,785 \quad (\text{II.4})$$

- Arrangement pentagonal



$$v_{fpentagone} = \frac{\frac{3}{10} * (\pi * r^2) * 5}{\frac{5}{4 * \tan(36^\circ)} * e^2} = \frac{6 * \pi * \tan(36^\circ)}{5} * \left(\frac{r}{e}\right)^2 \quad (\text{II.5})$$

$$v_{fpentagonemax} = \frac{6 * \pi * \tan(36^\circ)}{5} * \left(\frac{e}{2 * e}\right)^2 = 0,685 \quad (\text{II.6})$$

## ANNEXE V

### PROGRAMME MATLAB POUR CALCULER LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA FIBRE ÉLÉMENTAIRE DE COCO OÙ L'AMF EST ÉGAL À 40°

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Thomas LEPLANOIS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Propriétés mécaniques de la fibre végétale
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%% Initialisation
clear all;
close;
clc;

%% Paramètres physiques

% Propriétés mécaniques de la cellulose cristalline (MPa)
Elcc = 140000;
Etcc = 27200;
Gltcc = 4400;
NUltcc = 0.1;
dcc = 1.6;

% Propriétés mécaniques de la cellulose amorphe (MPa)
Eac = 9000;
Gac = 4300;
NUac = 0.23;
dac = 1.42;

% Propriétés mécaniques de l'hémicelluloses (MPa)
Elhc = 7500;
Ethc = 3750;
Glthc = 1750;
NUltc = 0.2;
dhc = 1.4;

% Propriétés mécaniques de la lignine
Elg = 3000;
Glg = 760;
NULg = 0.3;
dlg = 1.4;

```

```

%% Composition des fibrilles pour la fibre de chanvre
% Fraction massique de la cellulose
Mc = 0.70;
% Pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose
Pcc = 0.60;
% Pourcentage de cellulose amorphe dans la cellulose
Pac = 1-Pcc;
% Fraction massique de la cellulose
Mcc = Mc*Pcc;
% Faction massique de la cellulose
Mac = Mc*Pac;
% Faction massique de l'hémicellulose
Mhc = 0.15;
% Faction massique de la lignine
Mlg = 0.04;
% Faction massique de la matrice
Mhlg = Mhc + Mlg;
% Pourcentage de l'hémicellulose amorphe dans la matrice
Phc = Mhc*1/Mhlg;
% Pourcentage de la lignine amorphe dans la matrice
Plg = Mlg*1/Mhlg;

%% Composition des fibrilles pour la fibre de coco
% Fraction massique de la cellulose
Mc = 0.43;
% Pourcentage de cellulose cristalline dans la cellulose
Pcc = 0.60;
% Pourcentage de cellulose amorphe dans la cellulose
Pac = 1-Pcc;
% Fraction massique de la cellulose
Mcc = Mc*Pcc;
% Faction massique de la cellulose
Mac = Mc*Pac;
% Faction massique de l'hémicellulose
Mhc = 0.002;
% Faction massique de la lignine
Mlg = 0.54;
% Faction massique de la matrice
Mhlg = Mhc + Mlg;
% Pourcentage de l'hémicellulose amorphe dans la matrice
Phc = Mhc*1/Mhlg;
% Pourcentage de la lignine amorphe dans la matrice
Plg = Mlg*1/Mhlg;

%% Masse volumique des fibrilles, de la matrice et de la fibre élémentaire
dc = dcc*Mcc/Mc + dac*Mac/Mc;
dhlg = dhc*Mhc/Mhlg + dlg*Mlg/Mhlg;
dcom = (Mc/(Mhlg+Mc))*dc + (Mhlg/(Mhlg+Mc))*dhlg;

% Fraction volumique de la cellulose cristalline
Vcc = (dc/dcc)*(Mcc*1)/Mc;
% Fraction volumique de la cellulose amorphe
Vac = (dc/dac)*(Mac*1)/Mc;

```

```

% Fraction volumique de l'hémicellulose
Vhc = (dhlg/dhc)*(Mhc*1)/Mhlg;
% Fraction volumique de la lignine
Vlg = (dhlg/dlg)*(Mlg*1)/Mhlg;

% La fraction volumique de la cellulose
Vf = (dcom/dc)*Mc;
% Vf = 0.785;           % Pour un arrangement triangulaire
% Vf = 0.907;           % Pour un arrangement carré

% La fraction volumique de la matrice
Vhlg = (dcom/dhlg)*Mhlg;
Vmat = Vhlg;
% Vmat = 1 - Vf;        % Pour un arrangement triangulaire ou carré

%% Propriétés mécaniques des microfibrilles celluloses
Elf = Vcc*Elcc + Vac*Eac;
Etf = 1/(Vcc/(Etcc) + Vac/Eac);
Gltf = 1/(Vcc/Gltcc + Vac/Gac);
NUltf = Vcc*NUltcc + Vac*NUac;
NUtlf = NUltf*(Etf/Elf);

%% Propriétés mécaniques des autres constituant (ou les pectines, les
% cires et les extractibles sont ignorés)
Elmat = Vhc*Elhc + Vlg*Elg;
Etmat = 1/(Vhc/Ethc + Vlg/Elg);
Gmat = 1/(Vhc/Glthc + Vlg/Glg);
NUmat = Vhc*NUlthc + Vlg*NUlg;
NUtlmat = NUmat*(Etmat/Elmat);

%% Propriétés mécaniques de la fibre
% Le module d'élasticité suivant l'axe longitudinale
El = Vf*Elf + Vmat*Elmat;
fprintf('Le module d'élasticité suivant l'axe longitudinale :\n')
fprintf('El = %f',El)
fprintf(' MPa\n\n')
%-----
-
% Le module d'élasticité suivant l'axe transversale
Et = ((Etf*Etmat)/(Etmat+Etf*(1-sqrt(Vf))/sqrt(Vf))) + (1-sqrt(Vf))*Etmat;
fprintf('Le module d'élasticité suivant l'axe transversale :\n')
fprintf('Et = %f',Et)
fprintf(' MPa\n\n')
%-----
-
% Le module de cisaillement suivant l'axe de référence -
Gxy(E1,E2,NU12,G12,theta)
Glt = 1/(Vf/Gltf + (Vmat/Gmat));
fprintf('Le module de cisaillement suivant l'axe de référence:\n')
fprintf('Glt = %f',Glt)
fprintf(' MPa\n\n')
%-----
-

```

```

% Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence -
NUxy(E1,E2,NU12,G12,theta)
NUlt = Vf*NUltf + Vmat*NUmat;
fprintf('Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence:\n')
fprintf('NUlt = %f',NUlt)
fprintf('\n\n')
%-----
-
% Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence -
NUyx(E1,E2,NU21,G12,theta)
NUtl = NUlt*(Et/E1);
fprintf('Le coefficient de Poisson suivant l'axe de référence:\n')
fprintf('NUtl = %f',NUtl)
fprintf('\n\n')
%-----
-

```



## BIBLIOGRAPHIE

- Akin, D. E., Morrisson III, W. H., Gamble, G. R., Rigsby, L. L., Henrikson, G. et Eriksson, K.-E. L. (1997). Effect of retting enzymes on the structure and composition of flax cell walls. *Textile Research Journal*, 67(4), 279-287.
- Akintayo, C. O., Azeez, M. A., Beuerman, S. et Akintayo, E. T. (2016). Spectroscopic, Mechanical, and Thermal Characterization of Native and Modified Nigerian Coir Fibers. *Journal of natural fibers*, 13(5), 520-531.
- Andersson, S., Serimaa, R., Paakkari, T., Saranpää, P. et Personen, E. (2003). Crystallinity of wood and the size of cellulose crystallites in Norway spruce (*Picea abies*). *Journal Wood Sciences*, 49 (6), 531–537.
- Anglès, M. N. et Dufresne, A. (2001). Plasticized Starch/Tunicin Whiskers Nanocomposite Materials. 2. Mechanical behavior. *Macromolecules*, 34(9), 2921-2931.
- Ayrlmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., Bauchongkol, P. et White, R. H. (2011). Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composite Panel for Automotive Interior Applications. *Fibers and Polymers*, 12(7), 919-926.
- Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites: Part A*, 33(7), 939–948.
- Baillie C. (2004). *Green composites : Polymer composites and the environment*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Limited
- Baley, C. (2013). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Technique de l'ingénieur*, AM5130 V2, 1-17.
- Beckermann, G. (2007). *Performance of hemp-fibre reinforced polypropylene composite materials*. (Thèse de doctorat, University of Waikato, Waikato, Nouvelle Zélande).
- Bergander, A. et Salmén, L. (2000). Variations in transverse fibre wall properties: relations between elastic properties and structure. *Holzforschung*, 54(6), 654-660.
- Biagiotti, J., Puglia, D. et Kenny, J. M. (2004). A review on natural fibre-based composites- Part I. *Journal of Natural Fibers*, 1(2), p. 37-68.
- Bismarck, A., Supriya, M. et Lampke, T. (2005). Plant Fibers as Reinforcement for green composites ». Dans Mohanty, A. K., Misra, M. et Drzal, L. T., *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. (pp. 37-108). New York, NY: CRC Press.
- Bledzki, A. K. et Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer science*, 24(2), 221-274.

- Bodig, J. et Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of wood and wood composites*. Krieger publishing company, Malabar, Florida : Krieger Publishing Company.
- Bodros E., Pillin, I., Montrelay, N. et Baley, C. (2007). Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications ? *Composites Science and Technology*, 67(3-4), 462-470.
- Bos, H., Van Den Oever, M. et Peters, O. (2002). Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 37(8), 1683-1692.
- Bouloc, P. (2006). *Le chanvre industriel : production et utilisations*. Paris, France : France agricole
- Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E. et Kenny, J. M. (2013). Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: Technology and applications. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 154-169.
- Brett, C. et Waldron, K. (1996). *Physiology and Biochemistry of plant cell walls*. Londres, UK : Champman and Hall.
- Brooker R. J., Widmaier, E. P., Graham, L. E. et Stiling, P. D. (2008). *Biology*. New York, NY : McGraw-Hill Education.
- Burgert, I. (2006). Exploring the micromechanical design of plant cell walls. *American Journal of Botany*, 93(10), 1391–1401.
- Duval, A., Bourmaud, A., Augier, L. et Baley, C. (2001). Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Materials Letters*, 65(4), 797–800.
- Eichhorn, S. J., Baillie, C. A., Zafeiropoulos, N., Mwaikambo, L. Y., Ansell, M. P., Dufresne, A., Entwistle, K. M., Herrera-Franco, P. J., Escamilla, G. C., Groom, L., Hughes, M., Hill, C., Rials, T. G. et Wild, P.M. (2001). Current international research into cellulosic fibres and composites. *Journal of Materials Science*, 36(9), 2107-2131.
- Flandrin-Bletty M. (1996). *Technologie et chimie des textiles*. Toulouse, France : Cépaduès-éditions.
- Gassan, J., Chate, A. et Bledzki, A. K. (2001). Calculation of elastic properties of natural fibers. *Journal of Materials Science*, 36(15), 3715–3720.
- Geethamma, V. G., Joseph, R., et Thomas, S. (1995). Short coir fiber-reinforced natural rubber composites: Effects of fiber length, orientation, and alkali treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, 55(4), 583-594.

- Geethamma, V. G., Mathew, K. T., Lakshminarayanan, R. et Sabu, T. (1998). Composite of short coir fibres and natural rubber : effect of chemical modification, loading and orientation of fibre. *Polymer*, 39(6-7), 1483-1491.
- Gibson, R. F. (2011). *Principles of composite material mechanics*. New York, NY, États-Unis : CRC Press.
- Hearle, J. W. S. (1963). The fine structure of fibers and crystalline polymers : interpretation of the mechanical properties of fibers. *Journal of Applied Polymers Science*, 7, 1207-1223.
- Ho Thi, T. N. (2008). *Étude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco*. (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure, Montréal, QC, Canada).
- Jacquet, E., Trivaudey, F. et Varchon, D. (2000). Calculation of the transverse modulus of a unidirectional composite material and of the modulus of an aggregate Application of the rule of mixtures. *Composites Science and Technology*, 60, 345-350.
- Kacik, F., Kacikova, D. et Bubenikova, T. (2006). Spruce wood lignin alterations after infrared heating at different wood moistures. *Cellulose Chemistry and Technology*, 40(8), 643-648.
- Keller, A. (2003). Compounding and mechanical properties of biodegradable hemp fiber composites. *Composite Science and Technology*, 63(9), 1307-1316.
- Klyosov A. A. (2007). *Wood-plastic composites*. Hoboken, NJ, États-Unis : John Wiley & Sons, Inc.
- Li, Z., Wang, X. et Wang, L. (2004). Properties of hemp fiber reinforced concrete composites. *Fibers and Polymers*, 5(3), 187-197.
- Liu, M., Fernando, D., Daniel, G., Madsen, B., Meyer, A. S., Tutor Ale, M. et Thygesen, A. (2015). Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibers. *Industrial Crops and Products*, 69, 29-39.
- Madsen B. (2004). *Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites : An Experimental Study*. (Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, Lyngby, Danemark).
- Mahato, D. N., Mathur, B. K. et Bhattacharjee, S. (1995). Effect of alkali treatment on thermal stability and moisture rétention of coir fibre. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 20(4), 202-205.
- Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T., Selke, S. E., Harte, B. R. et Hinrichsen, G. (2005). Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites : An Introduction. Dans Mohanty,

- A.K., Misra, M. et Drzal, L.T., *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. (pp. 1-36). New York, NY: CRC Press.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J. et Yougblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review : structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941-3994.
- Mosiniak, M. (2011). Récolte, transformation et utilisation du chanvre. Repéré à <http://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/technologie-vegetal-textiles-585/page/6/>
- Müssig, J. et Stevens, C. (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. Londre, UK : Wiley-Blackwell.
- Munder, F, Füll, C. et Hempel, H. (2005). Processing of Bast Fibre Plants for Industrial Application. Dans Mohanty, A.K., Misra, M. et Drzal, L.T., *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. (pp. 109-140). New York, NY: CRC Press.
- Nykter, M., Kymäläinen, H.-R., Thomsen, A. B., Lilholt, H., Koponen, H., Sjöberg, A.-M. et Thygesen, A. (2008). Effects of thermal and enzymatic treatments and harvesting time on the microbial quality and chemical composition of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Biomass and Bioenergy*, 32, 392-399.
- Perez, S., Stinga, N. C., et Samain, D. (2010). Structure et Ingénierie du Matériau Cellulose. Dans Poux, M., Gourdon, C., et Cognet, P., *Génie des procédés durables. Du concept à la concrétisation industrielle*, (pp. 413-442). Paris, France : Dunod.
- Persson, K. (2000). *Micromechanical modelling of wood and fibre properties*. (Thèse de doctorat, Lund University, Lund, Suède).
- Placet, V., Trivaudey, F., Cisse, O., Gucheret-Retel, V. et Boubakar, L. (2012). Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres : a morphological structural or ultrastructural effect. *Composites : Part A*, 43, 275-287.
- Oksman, K. (2000). Mechanical properties of natural fibre mat reinforced thermoplastic. *Applied Composite Materials*, 7, 403-414.
- Rowell, R. M. and Anand, R. (1997). Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. Dans Leao, A. L., Carvalho, F. X. and Frollini, E. *Lignocellulosic-Plastics Composites*, (pp. 23-51). Sao Paulo, Brésil : Universidade de Sao Paulo.
- Salmén, L., Kolseth, P. et Rigdahl, M. (1986). Composite systems from natural and synthetic polymers. Amsterdam, Pays-Bas : In Elsevier Science Publisher B. B.
- Salmén, L. et Fahlén, J. (2006). Reflections on the ultrastructure of softwood fibres. *Cellulose Chemistry and Technology*, 40(3), 181-185.

- Sakakibara, K. (1980). A structural model of softwood lignin. *Wood Science and Technology*, 14, 89-100.
- Satyanarayana, K. G., Kulkarni, A. G. et Rohatgi, P. K. (1981). Structure and properties of coir fibres. *Proceedings of the Indian Academy of Science*, 4(4), 419-436.
- Satyanarayana, K. G., Guimaraes, J. L. et Wypych, F. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I : Source, production, morphology, properties and applications. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1694-1709.
- Sedan, D., (2007), *Étude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite*. (Thèse de doctorat, Université de Limoges, Limoges, France).
- Sefriouimanar, K. (2014). *Étude des propriétés mécaniques de la fibre de chanvre afin de connaître sa résistance en fatigue dans l'air et dans l'eau*. (Rapport de projet, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada).
- Srihara, P. A., Ramana, K. V., Balakrishna Murthy, V. et Rao, G. S. (2013). Role of finite element method (FEM) in predicting transverse modulus of fiber-reinforced polymer (FRP) composites : A revelation. *Intrnational Journal of Physical Sciences*, 8(29), 1526-1536.
- Symington, M. C., Banks, W. M. et West, O. D. (2009) Tensile testing of cellulose based natural fibers for structural composite applications. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1083-1108.
- Tomeczak, F., Demétrio Sydenstricker, T. H. et Satyanarayana, K.G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II : Morphology and properties of brazilian coconut fibers. *Composites : Part A*, 38, 1710-1721.
- Thomas, S. (2000). *Renewable materials for automotive applications*. Stuttgart, Allemagne : Daïmler - Chrysler.
- Thomas, S., Paul, S. A., Pothan, L. A. et Deepa, B. (2011). Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. Bans Kalia, S., Kaith, B. et Kaur, I., *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. (pp. 3-42). Berlin, Allemagne : Springer, Berlin, Heidelberg.
- Thygesen, A. (2006). *Properties of hemp fibre polymer composites : an optimisation of fibre properties using novel defibration methods and fibre characterisation*. (Thèse de doctorat, Risø National Laboratory, Roskilde, Danemark).
- Thygesen, A., Thomsenc, A. B., Daniel, G. et Lilholt, H. (2007). Comparison of composites made from fungal defibrated hemp with composites of traditional hemp yarn. *Industrial Crops and Products*, 25, 147–159.

- Tran, L. Q. N., Nguyen Minh, T., Fuentes, C. A., Truong Chi, T., Van Vuure, A. W. et Verpoest, I. (2015). Investigation of microstructure and tensile properties of porous natural coir fibre for use in composite materials. *Industrial Crops and Products*, 65, 437-445.
- Vallade J. (1999). *Structure et développement de la plante. Morphogenèse et biologie de la reproduction des Angiospermes*. Paris, France : Dunod.
- Van Sumere, C. F., (1992). Retting of flax with special reference to enzyme retting. Dans Shekhar Sharma, H. S. et Van Sumere, C. F., *Biology and processing of flax*. (pp. 157–198). Belfast, UK : M Publications
- Van Sumere, C. F. et Shekhar Sharma, H. S. (1991). Analysis of fine flax fibre produced by enzymatic retting. *Aspects of Applied Biology*, 28, 15–20.
- Wakelyn, P. J., Bertonière, N. R., French, A. D., Thibodeaux, D. P., B. Triplett, A., Rousselle, M.-A., Goynes, W. R. Jr., Edwards, J. V., Hunter, L., D. McAlister, D. et Gamble, G. R. (2006). Cotton Fiber Chemistry and Technology. In Lewin, M., III (Éds), *Handbook of Fiber Chemistry*. (pp. 521-666). New York, NY: CRC Press.
- Yan, L., Chouw, N., Huang, L. et Kasal, B. (2016). Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of coir fibres, coir fibre reinforced-polymer composites and reinforced-cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 112, 168-182.
- Yastrebov, O. I. (1974). Correlation between the breaking stress and SHF dielectric losses in cellulose compositions. *Polymer Mechanics*, 10(5), 825-827.
- Zimmermann, T., Pohlerand, E. et Geiger, T. (2004). Cellulose fibrils for polymer reinforcement. *Advanced Material Engeneering*, 6(9), 754 -761.